EXPERTISES

SEPT. 2020

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE SYSTEMES RENOUVELABLES DE PRODUCTION DE CHALEUR ET DE FROID DE GRANDE PUISSANCE

Basés sur des pompes à chaleur ou des installations solaires thermiques

Rapport d'étude
Version finale

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :

Solinnen
ENGIE Lab
TRACTEBEL ENGIE

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des organisations qui ont participé à l'étude et qui ont pu enrichir et préciser les données, et ainsi contribuer à cette étude ACV. Nous remercions également les membres du comité de pilotage pour les discussions auxquelles ils ont pris part et leurs nombreux apports :

Hugo Belin (FEDENE)
Nadine Berthomieu (ADEME)
Fabrice Bordet (Greenonetec)
Marina Boucher (ADEME)
Emmanuelle Brière (UNICLIMA)
Laurent Cadiou (DGEC)
David Canal (ADEME)
Astrid Cardona Maestro (ADEME)
Gilles Croize Pourcelet (DGEC)
Sophie Dehayes (DGEC)
Pierre Delmas (Newheat)
Marie Frapin (EIVP)
Philippe Haberschill (INSA Lyon)
Tristan Hubé (ADEME)
Valérie Laplagne (UNICLIMA)
Philippe Léonardon (ADEME)
Etienne Letournel (Newheat)
Franck Liaudet (CIAT)
Michèle Mondot (CETIAT)
Louis Marie de Noyel (DGEC)
Guillaume Perrin (FNCCR)
Bruno Peuportier (Armines / CES)
Clément Rascoussier (CARRIER)
Charlotte Roux (EIVP)
Nicolas Savariaux (Eklor)
Gérard Servier (Lacaze Energie)
Marie-France Terrier (CNAM)
Brice Tréméac (CNAM)
David Veillon (CARRIER)
Marianne Villey (CEREMA)
Maxime Viot (Savosolar)
Bill Wong (Natural Resources Canada)
Mingliang Zhou (Lacaze Energie)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, SOLINNEN, ENGIE Lab CRIGEN, TRACTEBEL. 2020. Analyse du cycle de vie de systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de grande puissance. 564 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne dans la librairie ADEME.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 18MAR000335

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :

Solinnen : Guillaume AUDARD, Alexandre LEMAIRE, Cécile BEAUDARD, Philippe OSSET
ENGIE Lab CRIGEN : Camille JEANDAUX, Raphaël BRIERE, Anne PRIEUR-VERNAT
TRACTEBEL : Justin PARROT, Emir POUSSE, Thierry FROUSSEREAU

Coordination technique - ADEME :

SAUZE Marie, ingénieur évaluation environnementale, ACV des énergies renouvelables
Service : Réseaux et Energies Renouvelables

TABLE DES MATIERES

Résumé 6
1 Avant-propos 7
2 Objectifs de l'étude 8
2.1 Contexte 8
2.2 Applications envisagées 11
2.3 Raisons conduisant à la réalisation de l'étude, et contexte de décision 13
2.4 Public visé par le rapport 13
2.5 Acteurs de l'étude 14
2.6 Affirmations comparatives destinées à être divulguées au public 15
3 Champ de l'étude 16
3.1 Définition des cas d'étude 16
3.2 Eléments communs à tous les cas d'étude 21
3.3 Cas d'étude 1 54
3.4 Cas d'étude 2 59
3.5 Cas d'étude 3 65
3.6 Cas d'étude 4 69
3.7 Cas d'étude 5 75
3.8 Cas d'étude 6 77
3.9 Cas d'étude 7 79
3.10 Cas d'étude 8 81
3.11 Cas d'étude 9 83
3.12 Cas d'étude 10 85
3.13 Cas d'étude 11 87
4 Inventaire du cycle de vie 94
4.1 Eléments communs à tous les cas d'étude 94
4.2 Inventaire de Cycle de Vie de l'ensemble des systèmes 101
4.3 Cas d'étude 1 110
4.4 Cas d'étude 2 125
4.5 Cas d'étude 3 140
4.6 Cas d'étude 4 151
4.7 Cas d'étude 5 164
4.8 Cas d'étude 6 170
4.9 Cas d'étude 7 175
4.10 Cas d'étude 8 180
4.11 Cas d'étude 9 188
4.12 Cas d'étude 10 194
4.13 Cas d'étude 11 200

5 Evaluation de l'impact du cycle de vie 210
5.1 Procédure d'analyse commune à tous les cas d'étude 210
5.2 Cas d'étude 1 212
5.3 Cas d'étude 2 227
5.4 Cas d'étude 3 240
5.5 Cas d'étude 4 253
5.6 Cas d'étude 5 268
5.7 Cas d'étude 6 278
5.8 Cas d'étude 7 286
5.9 Cas d'étude 8 296
5.10 Cas d'étude 9 304
5.11 Cas d'étude 10 311
5.12 Cas d'étude 11 317
6 Analyses de sensibilité locales 327
6.1 Eléments communs à tous les cas d'étude 327
6.2 Cas d'étude 1 330
6.3 Cas d'étude 2 345
6.4 Cas d'étude 3 359
6.5 Cas d'étude 4 377
6.6 Cas d'étude 5 391
6.7 Cas d'étude 6 414
6.8 Cas d'étude 7 424
6.9 Cas d'étude 8 441
6.10 Cas d'étude 9 451
6.11 Cas d'étude 10 460
6.12 Cas d'étude 11 470
7 Analyses d'incertitude 477
7.1 Eléments communs à tous les cas d'étude 477
7.2 Cas d'étude 1 479
7.3 Cas d'étude 2 485
7.4 Cas d'étude 3 490
7.5 Cas d'étude 6 495
7.6 Cas d'étude 7 500
8 Conclusions générales 506
8.1 Synthèse des principaux résultats 506
8.2 Limites à la généralisation des conclusions 524
8.3 Enseignements généraux, tous cas d'étude confondus 525
8.4 Perspectives 526

Références bibliographiques 528
Index des tableaux et figures 530
Sigles et acronymes 545
Glossaire 545
ANNEXE 1 : Liste des procédés ecoinvent utilisés 547
ANNEXE 2 : Comparaison des impacts des mix électriques utilisés pour les analyses de sensibilité 551
ANNEXE 3 : Déclaration de revue critique d'ACV 554

Résumé

Cette étude a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux de plusieurs systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid, de puissance supérieure à 250 kW via la méthode d'analyse du cycle de vie. Les systèmes étudiés sont basés sur des pompes à chaleur géothermiques ou des installations solaires thermiques.

L'étude comprend onze cas d'études, représentatifs de différents contextes d'utilisation des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance :

- 5 cas d'étude couvrent des usages de réseaux urbains (cas 1 à 4 et cas 11) : l'étude montre que les systèmes renouvelables de grande puissance ont des émissions de GES plus faibles que les solutions centralisées de grande puissance les plus couramment déployées actuellement (chaufferie gaz ou groupe froid aérothermique). Cependant, il existe des cas où une solution décentralisée peut avoir une meilleure performance carbone, notamment lorsque le taux de couverture EnR est plus élevé en décentralisé qu'en centralisé (l'utilisation d'un système d'appoint alimenté par une énergie fossile étant une pratique courante pour les réseaux urbains).
- 6 cas d'étude couvrent des usages industriels (cas 5 à 10) : l'étude montre que les systèmes renouvelables de grande puissance ont des émissions de GES plus faibles que les systèmes de référence auxquels ils ont été comparés.

Les systèmes renouvelables étudiés peuvent avoir des impacts supérieurs aux systèmes de référence pour certaines catégories d'impact, notamment les particules fines, l'acidification, ou la toxicité humaine. Ces impacts causent des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, mais l'étude montre qu'ils ne sont pas suffisants pour contrebalancer les bénéfices liés à une meilleure performance carbone. En matière de ressources, l'utilisation de pompes à chaleur et de panneaux solaires thermiques dans les contextes étudiés permet de diminuer l'impact sur l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, mais contribue généralement davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

ABSTRACT

This study aims at evaluating the environmental burdens of different renewable energy-based high power heating and cooling systems, with powers over 250kW, using the life cycle assessment methodology. The studied systems are based on heat pumps or are solar heating installations.

The study includes eleven case studies, that are representative of different uses of those high power heating and cooling systems :

- 5 case studies refer to urban network applications (cases 1 to 4 and case 11) : the study shows that renewable-based high power heating and cooling systems present lower GHG emissions than their conventional alternative high power solutions (gas furnaces or aerothermal refrigeration units). In some cases, decentralized solutions can show a better carbon performance. This is especially true when the renewable cover rate is higher in the decentralized units than in the centralized ones (using fossil-based ancillary systems is a common practice in urban network application).
- 6 case studies refer to industrial applications (cases 5 to 10) : the study shows that the renewable-based high power systems present lower GHG emissions compared to their conventional reference.

The studied renewable-based systems can however show higher impacts than their conventional alternative for some impacts categories, such as the particulate matter, the acidification (terrestrial and freshwater) and the human toxicity. Those impacts are responsible of human health and ecosystems damages, but the study shows those impacts are not high enough to cancel out the benefits linked to the better carbon performance of the renewable energy-based systems. Regarding the resources, the use of heat pumps and solar panels, in the contexts they were analyzed in this study, has a lower impacts on the fossil energetic resources depletion indicator but is a greater contributor to the minerals and metals depletion indicator.

1 Avant-propos

Ce rapport a été élaboré par le groupement Solinnen, ENGIE Lab CRIGEN et TRACTEBEL pour le compte de l'ADEME. Les conditions du contrat prévoient, sans que cela ne soit exhaustif, que le groupement n'aura aucune responsabilité :

- Concernant la façon dont le livrable est utilisé par l'ADEME ;
- Concernant les suites résultant de l'utilisation du livrable par l'ADEME ;
- Vis-à-vis de tiers exploitant le présent livrable.

Par ailleurs, les informations et conclusions qui se trouvent dans ce rapport ont été élaborées dans un contexte précis. Elles pourraient être différentes dans un autre contexte, notamment dans le cadre de l'usage d'informations et de données différentes de celles qui ont été choisies par l'ADEME.

Le lecteur du présent rapport est le seul responsable de l'usage qu'il en fera. Il ne saura tenir le groupement pour responsable des conséquences qui en découlent, notamment lors de l'usage de citations extraites de leur contexte.

Cette étude d'analyse du cycle de vie a été réalisée selon les exigences des normes suivantes :

- NF EN ISO 14040:2006 : Management Environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre
- NF EN ISO 14044:2006 : Management Environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.

Cette étude s'appuie également sur les recommandations du référentiel ILCD [1], rédigé par le Joint Research Center de la Commission Européenne.

2 Objectifs de l'étude

2.1 Contexte

Un certain nombre de solutions énergétiques de grande puissance permettent de produire de la chaleur et/ou du froid pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement dans des usages industriels ou à l'échelle d'un quartier. Les sources d'énergie sont multiples (gaz, fioul, énergies renouvelables, etc.) et peuvent avoir un impact environnemental ou sur la santé différent, selon que le choix énergétique se porte vers une solution « conventionnelle » ou vers une solution « renouvelable ».

L'ADEME, par l'intermédiaire du Fonds Chaleur, finance des projets de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R), ainsi que les réseaux de chaleur liés à ces installations.

A ce jour, même si les performances environnementales et énergétiques de ces systèmes commencent à être relativement connues, très peu d'études visent à évaluer leurs impacts sur l'environnement tout au long de leur cycle de vie (incluant les étapes de fabrication, le transport, la gestion des déchets en fin de vie, etc.).

2.1.1 La production de chaleur et de froid en France

2.1.1.1 Généralités

Selon les données de la Programmation Pluriannuelle de l'énergie (PPE), en France, la chaleur représentait 42,3% de la consommation finale d'énergie en 2017, soit 741 TWh [2]. Les secteurs résidentiels et tertiaire représentent 65 % de la consommation finale de chaleur, l'industrie représente 30 %, la part liée à l'agriculture est faible.

La chaleur est essentiellement produite à partir de gaz pour 40 %, puis par les énergies renouvelables (biomasse, pompes à chaleur, géothermie, biogaz, solaire thermique) à 21 %, l'électricité et le pétrole (respectivement 18 % et 16 %) et de façon marginale par le charbon (5 %).

La part relative des énergies renouvelables progresse de 0,8 point par an en moyenne depuis 2010. Cette hausse significative résulte à la fois d'une augmentation de la production de chaleur par des sources renouvelables et d'une baisse de la consommation finale de chaleur (dû à la rénovation énergétique des bâtiments). En 2028, la production de chaleur renouvelable se situerait entre 219 et 247 TWh. La PPE prévoit que le besoin total en chaleur devrait être de 639 TWh en 2023 et 579 TWh en 2028.

Selon la FEDENE [3], qui réalise une enquête annuelle sur les réseaux de chaleur en France, il existait en 2018 en France 781 réseaux de chaleur, desservant 5 781 km de longueur. Ils ont permis de livrer 25,4 TWh de chaleur nette[1], aux 40 116 bâtiments raccordés, soit 2,42 millions d'équivalents logement.

Le bouquet énergétique moyen des réseaux de chaleur français en 2018 est présenté à la Figure 2-1. Le gaz naturel représentait 37 % de la production, suivi des Unités de Valorisation Energétique (UVE), qui produisent de la chaleur en incinérant des déchets (25 %), et de la biomasse (22 %). Ces réseaux alimentent principalement les secteurs résidentiels (54 % des livraisons) et tertiaire (33 %).

[1] La chaleur nette correspond à l'énergie livrée en sous-station et facturée à l'abonné.

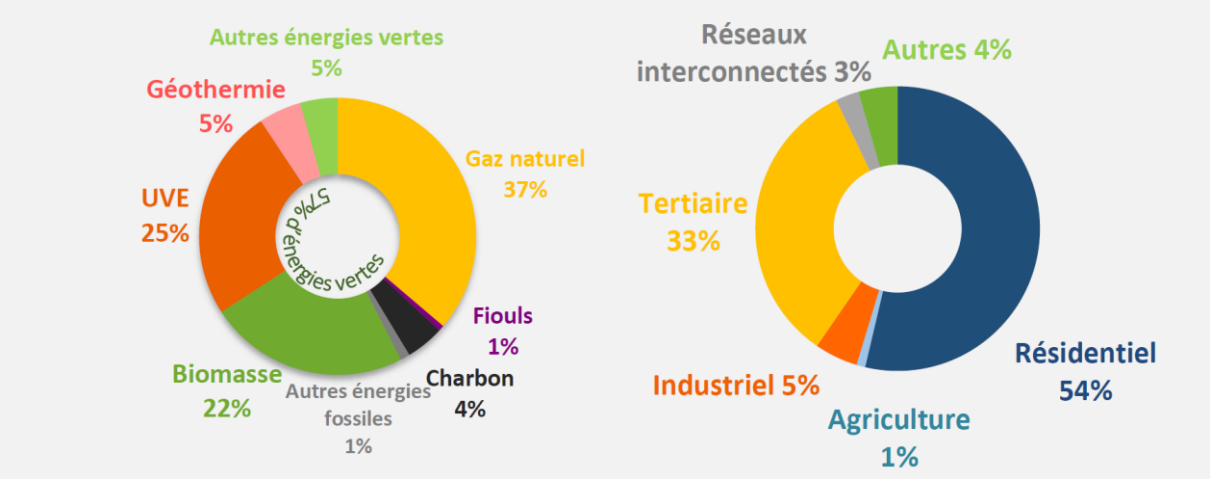


Figure 2-1 : Bouquet énergétique et secteurs de livraison pour les réseaux de chaleur français en 2018 [4]

Les réseaux de froid ont été mis en place plus tardivement. En 2018, avec une longueur cumulée de 202 km, les 23 réseaux de froid ont permis de livrer 1,05 TWh d'énergie calorifique à 1 381 bâtiments, principalement des bâtiments tertiaires, comme le montre la figure ci-dessous.

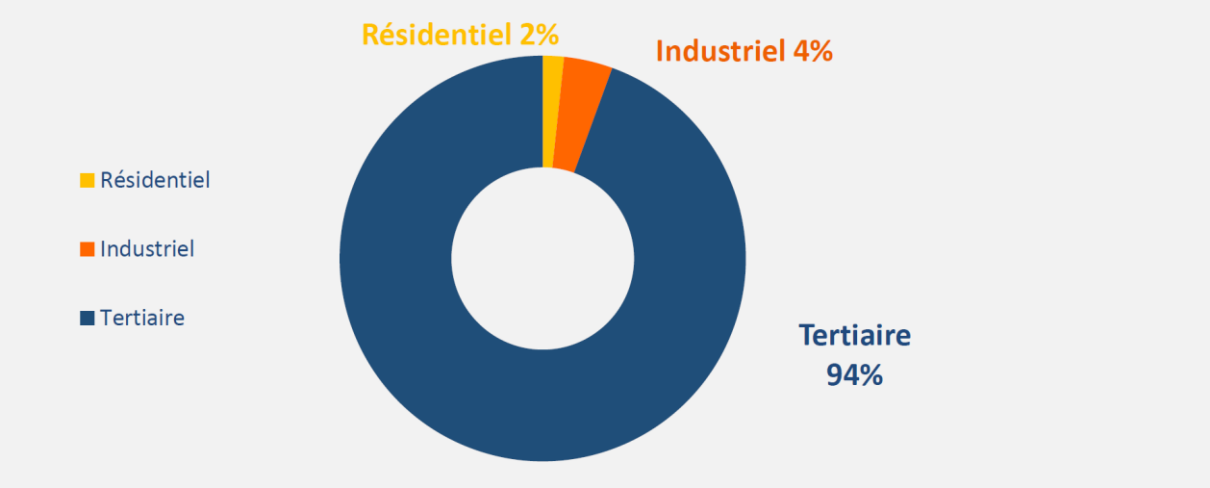


Figure 2-2 : Secteurs de livraison de froid par les réseaux de froids français en 2018 [4]

Selon les estimations de l'Institut International du Froid [5], à l'échelle mondiale, le secteur du froid serait responsable de 17% de la consommation électrique. Cette consommation aurait lieu pour 45 % dans le secteur résidentiel, pour 39,5 % dans le secteur tertiaire et pour 15,4 % dans le secteur industriel.

Selon le guide ADEME sur la maitrise de l'énergie dans le froid industriel [6], en France, la consommation électrique pour la production de froid industriel (hors auxiliaires et sur le champ de l'industrie manufacturière seule, donc hors entrepôts logistiques) représente 13 % de la consommation de l'ensemble des systèmes avec moteurs électriques, ce qui représentait environ 10 GWh pour l'année 2012.

2.1.1.2 Objectifs réglementaires

La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a fixé un objectif de 38 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale de chaleur en 2030. Pour atteindre cet objectif, il faut accélérer le rythme de croissance du taux de chaleur renouvelable à en moyenne 1,2 points par an, soit un rythme 1,5 fois plus soutenu que celui constaté entre 2010 et 2016. La LTECV a également fixé l'objectif de multiplier par 5 la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid d'ici 2030 par rapport à 2012.

Selon la LTECV , « Les équipements de récupération de chaleur in situ sont pris en compte comme des équipements de production d'énergie renouvelable dans l'ensemble des textes relatifs à la construction et à l'urbanisme, en particulier dans les réglementations thermiques du bâtiment ». Les objectifs fixés par cette loi concernent donc les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R).

La directive européenne 2009/28/CE fixait également pour la France un objectif de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie à l'horizon 2020, qui a été décliné pour la chaleur renouvelable en une cible de 33 % en 2020 . Cet objectif ne semble pas atteignable dans les délais prévus. Ces objectifs ont été récemment révisés dans le cadre de la Directive (UE) 2018/2001, qui prévoit que chaque État membre augmente au minimum de 1,3 points par an le taux de chaleur renouvelable et de récupération entre 2020 et 2030. Ce nouvel objectif est compatible avec le cadre fixé par la LTECV et les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie. À noter qu'il n'a pas été créé d'objectif de livraison de froid renouvelable et de récupération, dans l'attente d'une harmonisation des définitions européennes sur ce sujet qui est en cours de discussion entre les États-membres. Ces discussions devraient aboutir fin 2021.

Concernant la seule chaleur fournit par les réseaux de chaleur, la FEDENE fournit le graphique suivant qui montre les évolutions prévues par la PPE et la LTECV, avec la part d'EnR&R (légendées « livraisons vertes »). On voit notamment qu'un développement important des réseaux de chaleur est prévu (+60 % de chaleur livrée entre 2018 et 2023 ; multiplication par 2 environ en 2028 par rapport à 2018).

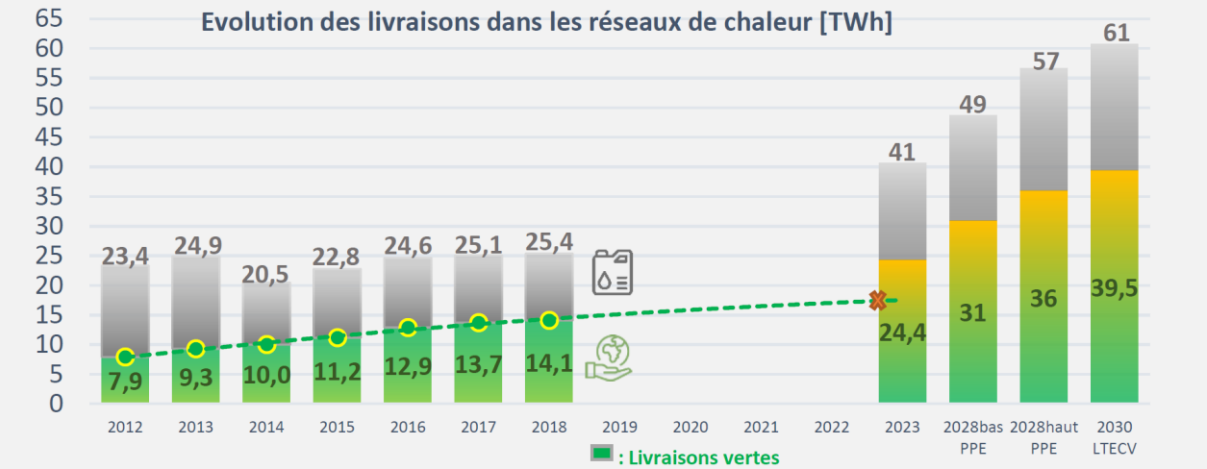


Figure 2-3 : Prévisions d'énergie à livrer par réseau de chaleur et part produite par des énergies renouvelables et de récupération [3]

Concernant les réseaux de froid, la PPE de 2019 prévoit un développement important à l'horizon 2030, comme l'illustre la figure suivante. La notion de « froid renouvelable et de récupération » n'a pas actuellement de définition légale, contrairement à la chaleur. Des travaux sont en cours au niveau européen pour arrêter une définition.

La Figure 2-4 présente les objectifs de développement des réseaux de froid en France prévus par la Programmation Pluriannuelle de l'Energie. Il est prévu de passer de 1,05 TWh livrés en 2018, à 1,4 TWh en 2023 et jusqu'à 2,70 TWh en 2028.

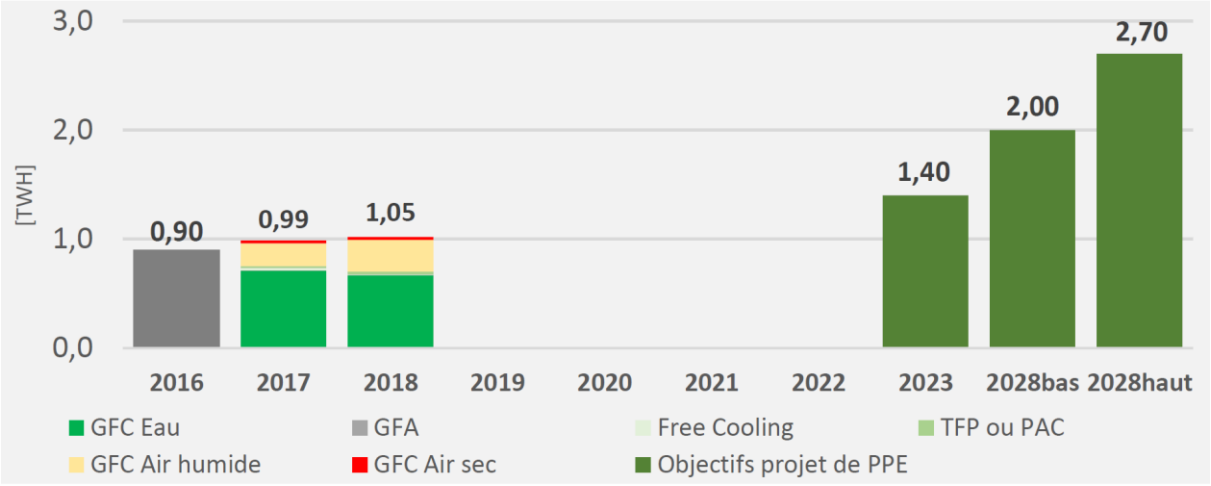


Figure 2-4 : Objectifs de développement des réseaux de froid en France [3]

2.1.2 Introduction à l'analyse du cycle de vie (ACV)

Ce chapitre décrit brièvement la méthode d'évaluation des impacts environnementaux utilisée lors de ce travail, en l'occurrence l'ACV.

L'ACV permet d'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service, en le rapportant à la fonction du système étudié. Cette méthode d'analyse, régie par l'ISO 14 040 (ISO, 2006) et l'ISO 14 044 (ISO, 2006), permet de considérer l'ensemble du cycle de vie. L'ACV est un outil d'aide à la décision qui favorise l'optimisation des caractéristiques environnementales du sujet analysé et permet d'effectuer un bilan environnemental.

L'ACV tient compte de l'extraction et du traitement des matières premières, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation et de la réutilisation du produit fini, et finalement, du recyclage et de la gestion des déchets en fin de vie.

L'ACV implique l'identification et la quantification des entrants et des sortants reliés au produit (ou service ou système), ainsi que l'évaluation des impacts potentiels associés à ces entrants et sortants. . L'ACV est un processus itératif et les choix effectués au cours de l'étude sont modifiés en fonction d'informations complémentaires.

Une ACV est donc constituée de quatre phases qui consistent à :

- définir les objectifs et le champ de l'étude : cette étape permet de définir le cadre de l'étude et d'intégrer les aspects environnementaux d'ores et déjà maîtrisés par le mandataire ;
- réaliser l'inventaire de tous les entrants et sortants du ou des systèmes de produits : à ce stade il est important de disposer de données cohérentes et fiables ;
- évaluer les impacts potentiels liés à ces entrants et sortants en faisant appel à une méthode d'évaluation des impacts reconnue sur le plan international ;
- interpréter les hypothèses de travail, les données d'inventaire et les résultats de l'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude.

2.2 Applications envisagées

L'ADEME souhaite appliquer la méthodologie de l'analyse du cycle de vie, afin d'évaluer des systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de puissance supérieure à 250 kW (ce qui correspond au chauffage d'environ 80 logements RT 2012). Les systèmes étudiés sont basés sur des **pompes à chaleur géothermiques** ou des **installations solaires thermiques**, et permettent d'alimenter une **installation industrielle** ou un **réseau urbain de chaleur ou de froid**. L'ADEME a intentionnellement choisi de ne pas inclure dans cette étude l'ensemble des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance, notamment :

- les chaudières biomasse : l'ADEME a lancé en parallèle à cette étude une analyse du cycle de vie dédiée au mode de chauffage au bois ;
- les pompes à chaleur aérothermiques de grande puissance.

Ces systèmes étudiés sont désignés sous l'appellation « systèmes renouvelables centralisés » lorsqu'ils alimentent des réseaux de chaleur ou de froid, ou simplement « systèmes renouvelables » pour une application industrielle. Par opposition, on désigne par « systèmes conventionnels » les systèmes à base d'énergie fossile (principalement gaz naturel).

Les applications envisagées pour cette étude sont les suivantes :

- **Comparer** les impacts environnementaux du cycle de vie de **systèmes de production de chaleur et / ou de froid renouvelable** à ceux de **systèmes conventionnels** équivalents ;
- **Comparer** les impacts environnementaux du cycle de vie de **systèmes de production de chaleur et / ou de froid renouvelable centralisés** alimentant un réseau de chaleur, à ceux de **systèmes décentralisés** (renouvelables ou conventionnels) alimentant chaque bâtiment indépendamment ;
- **Identifier les principales sources d'impacts** environnementaux des systèmes de production de chaleur et / ou de froid renouvelable au cours de leur cycle de vie.

Pour cela, onze cas d'étude, représentatifs de différents contextes d'utilisation des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance, permettent de comparer les performances de systèmes comparables :

- 5 cas d'étude couvrent des usages de réseaux urbains ;
- 6 cas d'étude suivants concernent des usages industriels.

Ces onze cas d'études couvrent une grande variété de situations. L'étude ne vise cependant pas à couvrir de manière exhaustive toutes les applications possibles des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance en France.

Représentativité temporelle visée pour les systèmes étudiés

Les systèmes étudiés sont représentatifs de systèmes éligibles au Fonds Chaleur de l'ADEME à l'année de la réalisation de l'étude. Le contexte réglementaire encadrant les systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance doit évoluer dans les prochaines années :

- Le règlement européen n° 517/2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés, dit « Règlementation F-gas II », prévoit des restrictions de la mise sur le marché (article 11) et des restrictions d'utilisation (article 13) de certains fluides frigorigènes aux horizons 2020, 2022 et 2025. Ces restrictions peuvent affecter les systèmes à base de pompes à chaleur :
  - R134a : retrait en 2022 ;
  - R404a : retrait en 2020 ;
  - R407c : retrait en 2022 ;
  - R410a : retrait en 2022.
- La transposition de la directive européenne 2015/2193, dite « Directive MCP » (Medium Combustion Plant) (application décembre 2018) prévoit :
  - La réduction des valeurs limites d'émission (VLE) pour le SO_2, les NO_x et les poussières présentes dans les fumées ;
  - Des modifications de nomenclature ICPE pour les chaudières de plus de 1 MW.
- Le règlement européen n°813/2013, applicable aux dispositifs de chauffage des locaux et aux dispositifs de chauffage mixtes (déjà en application), prévoit :
  - L'interdiction de la commercialisation des chaudières classiques à coupe tirage type B1 de moins de 400 kW, à partir de septembre 2018 ;
  - Seules les chaudières étanches (type C), sans coupe tirage (type B2), à condensation ou à bas NO_x pourront être commercialisées.

Les spécifications des systèmes étudiés dans cette étude ont été définies en tenant compte, dans la mesure du possible, de ces évolutions réglementaires. L'étude vise donc à fournir des **résultats valides pour la période 2019-2025**.

Représentativité géographique visée pour les systèmes étudiés

L'étude vise à étudier les systèmes les plus représentatifs possibles des systèmes mis en œuvre actuellement en France métropolitaine. L'ADEME s'est ainsi basée en partie sur les projets financés par le Fonds Chaleur pour définir les cas d'étude.

Représentativité technologique visée pour les systèmes étudiés

Les systèmes qui seraient techniquement réalisables, mais dont l'équilibre financier n'est pas compatible avec les contraintes budgétaires d'un maître d'ouvrage ne sont pas l'objet de cette étude.

2.3 Raisons conduisant à la réalisation de l'étude, et contexte de décision

La comparaison des systèmes de production de chaleur et / ou de froid renouvelables centralisés à d'autres systèmes équivalents permettra d'apporter à l'ADEME et aux différents acteurs des filières (industriels, maîtrise d'ouvrage) des informations fiables sur les avantages et inconvénients en matière d'impacts environnementaux, à utiliser ces systèmes. Cette étude pourra notamment servir à mieux caractériser les bénéfices environnementaux des projets financés par l'intermédiaire du Fonds Chaleur de l'ADEME. Elle pourra également contribuer à aider les maîtres d'ouvrages dans le choix de la technologie à utiliser pour répondre à leur besoin.
Ce premier type d'application relève donc de la **comparaison de produits ou services spécifiques** (« Comparison of specific goods or services » dans le référentiel ILCD).

L'identification des principales sources d'impacts environnementaux permettra notamment de fournir aux fabricants de ces systèmes des informations sur les principales sources d'impacts environnementaux de leurs systèmes, qui pourront servir de base pour entreprendre une démarche d'écoconception. Cette dernière application envisagée relève de **l'analyse des points faibles environnementaux** (« weak point analysis of a specific product » dans le référentiel ILCD).

Ces deux types d'applications envisagées sont classées par le référentiel ILCD dans la situation A : « Aide à la décision à l'échelle micro ». Conformément aux recommandations du référentiel ILCD, cette étude suit donc **une approche attributionnelle**.

Cette étude n'analysera donc pas les potentielles conséquences de la mise en œuvre à grande échelle de systèmes de production de chaleur et / ou de froid renouvelables centralisés à grande échelle. Ce type d'objectif demanderait de mettre en œuvre une approche conséquentielle, permettant de prendre en compte un certain nombre de conséquences indirectes sur le système d'arrière-plan[2], qui ne sont pas analysées dans le cadre de cette étude. Il est donc vivement conseillé de **prendre garde à ne pas généraliser les résultats et conclusions** fournis par cette étude à un autre contexte que celui ici.

2.4 Public visé par le rapport

L'ADEME envisage une communication large des résultats de cette étude :

- Auprès des professionnels des secteurs du bâtiment, de l'industrie et des énergies renouvelables ;
- Auprès des maîtres d'ouvrage ;
- Auprès de fabricants d'équipements de production de chaleur et de froid ;
- Auprès du grand public.

Ce rapport s'adresse à un public technique, mais sera rendu public par l'ADEME sur son site Internet. Il vise également à servir de support à la rédaction de plusieurs documents dérivés :

- Un document de communication à destination d'un public large de non-experts ;
- Un article à destination d'une revue scientifique.

[2] Il serait par exemple nécessaire de s'assurer qu'un déploiement à grande échelle de pompes à chaleur en remplacement de chaufferies gaz n'a pas pour conséquence indirecte de devoir investir dans des capacités de production électrique supplémentaires.

2.5 Acteurs de l'étude

2.5.1 Commanditaire

Cette étude a été commanditée par le Service Réseaux et Énergies Renouvelables (SRER) de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). L'ADEME est un acteur institutionnel chargé notamment de conseil au gouvernement et de mise en œuvre des politiques publiques en matière d'environnement et d'énergies renouvelables.

En collaboration avec les partenaires du projet, l'ADEME a été consultée dans certains choix méthodologiques. L'ADEME a également été un acteur dans la mise en relation auprès des industriels pour la collecte des données de l'étude.

2.5.2 Réalisateurs

L'étude a été réalisée par un groupement externe à l'ADEME, constitué des acteurs suivants :

- Solinnen, entreprise indépendante spécialisée dans le conseil environnemental et dans la réalisation d'analyse du cycle de vie.

- ENGIE Lab CRIGEN, centre de R&D et d'expertise opérationnelle du Groupe ENGIE dédié aux sources d'énergie (hydrogène, biogaz et GNL), aux énergies nouvelles dans les villes, les bâtiments et l'industrie de demain et aux technologies émergentes (informatique et IA, robots et drones, nanotechnologies et capteurs).

- TRACTEBEL, société internationale, d'origine belge, ayant une activité dans l'ingénierie, l'énergie (notamment pétrolière, gazière et nucléaire), l'industrie (pétrochimie...) et les infrastructures, filiale du groupe ENGIE.

2.5.3 Comité technique

Un comité technique (COTECH) a été mis en place afin de suivre le projet, sur les aspects de collecte de données (orientations, arbitrages), de choix des hypothèses et d'expertises dans les domaines d'étude. Les membres du comité technique sont :

- Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) du Ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) ;
- Fédérations professionnelles : Fédération des services énergie environnement (FEDENE), Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR) ;
- Centres de recherche : CNAM, CEREMA/DTerCE/DLA/GBA/BAT ;
- Fabricants de systèmes : Lacaze Energie, Eklor / KBB, SAVOSOLAR, NewHeat ;

Le comité technique s'est réuni à trois reprises :

- Réunion de lancement du comité technique le 5 octobre 2018 ;
- Réunion intermédiaire du comité technique le 6 janvier 2020 ;
- Réunion finale du comité technique le 25 septembre 2020.

2.5.4 Comité de revue critique

Cette étude a été soumise à revue critique par un comité présidé par Pyrène Larrey-Lassalle (NOBATEK/INEF4), et auquel participent Damien Dufour (Esteana) et Marion Sié (VERSo). La revue est effectuée parallèlement à l'étude. La revue a porté sur le présent rapport uniquement, incluant une description du modèle d'inventaire de cycle de vie (ICV) (Chapitre 4 & Annexe 1). Aucune vérification de la modélisation (c'est-à-dire des données telles que saisies dans le logiciel d'ACV) n'a été réalisée.

2.5.5 Déclaration d'absence de conflits d'intérêt

L'étude a été réalisée par un consortium de trois entités distinctes et complémentaires pour répondre à un appel d'offre au service de l'ADEME. Les objectifs de l'étude ainsi que le choix des cas d'études ont été réalisés par l'ADEME, maitrise d'ouvrage du projet, en amont de la sélection du groupement.

Le Comité Technique a été ouvert à l'ensemble des parties prenantes qui souhaitaient contribuer à l'étude, quels que soient leurs intérêts vis-à-vis des technologies comparées. Cette composition a donc permis de garantir la meilleure impartialité de la comparaison. 3 comités techniques ont eu lieu pour discuter des hypothèses et des résultats afin de soumettre au plus grand nombre les hypothèses prises et d'en augmenter la robustesse.

ENGIE Lab CRIGEN est l'entité R&D Corporate du groupe ENGIE. ENGIE n'étant pas un bailleur de solutions mais un énergéticien, aucune solution technique n'est privilégiée pour le Corporate. Il est impliqué du fait de ses filiales dans de nombreuses activités qui ont trait à la production de chaleur et de froid. L'étude a été réalisée de manière rigoureuse, sur la base des meilleures données disponibles, et indépendamment de tout intérêt que le groupe ENGIE pourrait avoir dans la promotion d'une technologie particulière.

L'étude a été soumise à une revue critique par un comité dont les membres sont indépendants du commanditaire et des réalisateurs de l'étude. Cette revue critique menée par des experts du domaine est un gage complémentaire de la fiabilité et de l'objectivité des résultats de l'étude.

2.6 Affirmations comparatives destinées à être divulguées au public

Cette étude contient des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public. Ainsi, les exigences additionnelles prévues par les normes ISO 14040:2006 et ISO 14044:2006 en ce qui concerne la réalisation, la documentation, la revue critique et rédaction du rapport sont également respectées.

3 Champ de l'étude

L'étude vise à étudier un ensemble de 11 systèmes de production de chaleur et de froid renouvelable de grande puissance, appelés dans la suite de ce rapport « systèmes étudiés ». Ces systèmes peuvent être mis en œuvre pour alimenter un réseau urbain de chaleur ou de froid, ou pour un usage industriel. Les systèmes étudiés sont comparés à d'autres systèmes permettant de répondre aux mêmes besoins, appelés « systèmes de référence ». Une synthèse des cas d'études évalués est présentée au § 3.1.2.

3.1 Définition des cas d'étude

3.1.1 Principes généraux et conventions de nommage

Les caractéristiques des onze cas d'étude analysés dans le cadre de cette étude ont été définis de manière à couvrir un large éventail d'applications des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance en France. Les caractéristiques principales ont été définies par l'ADEME, sur la base de leur expérience, et notamment des projets financés par le Fonds Chaleur ou en projet actuellement. Cependant, les cas d'études ne visent pas à être représentatifs de l'ensemble du marché : certains cas d'études sont très peu mis en œuvre à ce jour (c'est le cas pour les technologies à base de solaire thermique et des champs de sondes géothermiques sur réseau de chaleur par exemple). A l'inverse, d'autres cas très courants ne sont pas évalués dans le cadre de cette étude (la biomasse a volontairement été exclue du champ de l'étude par l'ADEME car elle fait l'objet d'une étude distincte).

Cas d'études de réseaux urbains

Pour les cas d'étude de réseaux urbains, deux grandes catégories de systèmes sont comparées :

- les systèmes dits centralisés, qui comprennent une ou plusieurs unités de production installées dans une chaufferie, et qui alimentent grâce à un réseau de chaleur (et/ou de froid) plusieurs sous-stations auxquelles sont reliées des bâtiments ;
- les systèmes dits décentralisés, qui sont un ensemble d'unités de production indépendantes, alimentant un bâtiment individuel.

Ainsi, pour chaque cas d'étude de réseau urbain, quatre systèmes sont comparés. Pour faciliter la lecture de ce rapport, une convention de nommage a été utilisée pour désigner chaque système. Pour chaque sigle, le symbole « # » correspond au numéro du cas d'étude :

- Le système étudié est un système de production de chaleur et/ou de froid de grande puissance renouvelable centralisé, désigné par le sigle « S#-RC ». Il est susceptible d'être financé par le Fonds Chaleur de l'ADEME comme listé dans les instructions générales du Fonds Chaleur 2020 :
  - Le solaire thermique ;
  - La géothermie (sondes géothermiques et systèmes sur aquifères) entre 0 et 200 m de profondeur ;
  - L'énergie sur l'eau de mer, de fleuve ou de rivière ;
  - La chaleur de récupération (UIOM, procédé industriel ou eaux usées).
- Le système de référence centralisé, désigné par le sigle « S#-Cref ». Il vise à être représentatif des systèmes de grande puissance les moins chers à déployer actuellement :
  - L'aérothermie, l'aqua-thermie,
  - Le gaz.
- Le système de référence décentralisé, désigné par le sigle « S#-Dref1 » : c'est un ensemble de systèmes installés dans chaque bâtiment considéré. Ils visent à être représentatifs des systèmes les moins chers à déployer actuellement :
  - L'aérothermie,
  - Le gaz.
- Le système de référence renouvelable décentralisé, désigné par le sigle « S#-Dref2 » : c'est un ensemble de systèmes installés dans chaque bâtiment considéré. Ils visent à être représentatifs des systèmes d'énergie renouvelable qui sont couramment déployés actuellement :
  - Le solaire thermique ;

- La géothermie (sondes géothermiques et systèmes sur aquifères) entre 0 et 200 m de profondeur ;
- L'énergie sur l'eau de mer ;
- La chaleur de récupération (procédé industriel ou eaux usées).

Les systèmes étudiés sont composés d'une unité de production principale (PAC ou solaire thermique), et d'une chaudière qui assure à la fois l'appoint et le secours en cas de panne du système principal. Le dimensionnement a été réalisé sur la base de deux critères liés à l'économie :

- Une part d'EnR (PAC) d'au moins 50% (de la production et non de la puissance installée), minimum pour bénéficier de subventions du Fonds Chaleur de l'ADEME au moment du lancement de l'étude[3].
- Un facteur de charge de 60% minimum (ratio entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance et le nombre d'heures annuel) afin de garantir un amortissement de la PAC (bien plus coûteuse qu'une chaudière).

Dans le cas des systèmes centralisés, plusieurs options de dimensionnement sont possibles pour fournir une puissance donnée : on peut choisir d'utiliser une seule unité de production ou plusieurs unités de taille plus modeste. Avoir plusieurs unités permet une plus grande flexibilité. On peut également avoir un taux de charge moyen plus élevé par machine, ce qui permet de limiter les pertes thermiques de l'équipement. Multiplier les unités de production permet aussi plus de redondance et donc facilite la gestion en cas de panne de plusieurs équipements. Ces considérations n'ont pas la même influence selon qu'il s'agit d'un système principal (utilisé le plus souvent possible) ou d'un système secondaire (pensé pour être utilisé uniquement en appoint ou en secours). Par exemple, pour le cas d'étude 1, lorsque les chaudières gaz sont utilisés pour l'appoint et le secours (S1-RC1 et S1-RC2), la puissance nécessaire est fournie par deux unités. Lorsque les chaudières gaz sont utilisés en tant que système principal (S1-Cref), la puissance a été répartie sur trois unités pour permettre plus de flexibilité dans la gestion. A la connaissance de Tractebel, il s'agit d'une pratique courante de dimensionnement.

Pour les systèmes de référence renouvelables décentralisés, aucun secours n'est pris en compte. En effet, dans les systèmes de plus petite puissance, la chaufferie est prise sur des surfaces à coût élevé (car généralement en centre-ville, avec une surface qui pourrait être utilisée pour des logements ou des bureaux). La multiplication des systèmes nuit au coût futur de maintenance et au coût du projet global par rapport à un système simple. Pour les PAC aérothermiques décentralisées, un appoint est réalisé par une résistance électrique intégrée à l'appareil, qui lui permet de fonctionner lorsque les températures sont trop basses pour faire fonctionner l'évaporateur à cause du gel.

Cas d'étude industriels

Pour les cas d'étude industriels, deux systèmes sont évalués. Pour faciliter la lecture de ce rapport, une convention de nommage a été utilisée pour désigner chaque système. Pour chaque sigle, le symbole « # » correspond au numéro du cas d'étude :

- Le système étudié, désigné par le sigle « S#-R » : c'est un système susceptible d'être financé par le Fonds Chaleur de l'ADEME comme listé dans les instructions générales du Fonds Chaleur 2018 :
  - Le solaire thermique ;
  - La géothermie (sondes géothermiques et systèmes sur aquifères) entre 0 et 200 m de profondeur ;
  - L'énergie sur l'eau de mer, de fleuve ou de rivière ;
  - La chaleur de récupération (UIOM, procédé industriel ou eaux usées).
- Le système de référence, désigné par le sigle « S#-Cref » : il est représentatif des pratiques les plus courantes actuellement :
  - Les chaufferies gaz pour la production de chaleur
  - Les groupes froid aérothermiques pour la production de froid.

[3] Le critère d'éligibilité au Fond Chaleur a évolué au cours de la réalisation de l'étude. Le critère du Fond Chaleur 2020 concernant les réseaux de chaleur est d'atteindre une alimentation globale au minimum par 65 % d'EnR&R : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/grandes-orientations-modalites-fonds-chaleur-2020.pdf

3.1.2 Présentation synthétique des cas d'étude

Les deux tableaux suivants présentent les caractéristiques principales des onze cas d'étude analysés dans ce rapport. Une description détaillée de chacun est présentée dans les § 3.3 à § 3.13.

Tableau 3-1 : Synthèse des cas d'étude de réseaux urbains

Cas	Cas d'étude	Energie à fournir	Systèmes étudiés	Systèmes centralisés de référence	Systèmes décentralisés de référence
1	Chauffage de 50 bâtiments en zone H2b : 50 x 100 kW, dont 4 MW de logements neufs et 1 MW de bureaux neufs.	10,2 GWh de chaleur Secondaire de chaque sous-station à 50/40°C.	**S1-RC1 :** Système principal : PAC (2 x 0,85 MW) sur capteurs géothermiques (1,1 MW) : 80 % du besoin Appoint et secours : Chaudières gaz (2 x 2,625 MW) : 20 % du besoin.	**S1-Cref :** Système principal :Chaufferie gaz : 3 x 1,75 MW Secours : 1,75 MW	**S1-Dref1 :** Chaudières gaz : 50 x 100 kW
			S1-RC2 : Système principal : PAC (2 x 0,85 MW) sur nappe phréatique (1,3 MW) : 83 % du besoin Appoint et secours : Chaudière gaz (2 x 2,625 MW) : 17 % du besoin		**S1-Dref2 :** PAC Air/eau : 50 x 100 kW
2	Chauffage et refroidissement de 20 bâtiments en zone H2b : • Chauffage : 20 x 50 kW, dont 0,4 MW de logements neufs et 0,6 MW de bureaux neufs. • Refroidissement : 20 x 50 kW (bureaux neufs uniquement).	• Chauffage : 1,8 GWh de chaleur ; secondaire de chaque sous-station à 50/40°C • Refroidissement : 2,4 GWh, secondaire de chaque sous-station à 7/12°C	**S2-RC :** Système principal : Thermo-frigo-pompe (0,27 MW) : 82 % du besoin chaud et 44 % du besoin froid Appoint et secours chaud : Chaudière gaz (3 x 350 kW) : 18 % du besoin chaud Appoint et secours froid : Groupe froid aérothermique (3 x 350 kW) : 56 % du besoin froid	**S2-Cref :** Chaufferie gaz : 2 x 525 kW (+ secours : 525 kW) Groupe froid aérothermie : 2 x 525 kW (+ secours 525 kW)	**S2-Dref1 :** Chaudière gaz : 20 x 50 kW Groupe froid air/eau : 20 x 50 kW
					S2-Dref2 : Thermo-frigo-pompe : 20 x 50 KW
3	Refroidissement de 10 bâtiments en zone H2b : 10 x 100 KW, dont 0,3 MW de bâtiments publics et 0,7 MW de bureaux anciens	2,7 GWh de froid. Secondaire de chaque sous-station à 7/12°C	**S3-RC :** Système principal : Groupe froid à absorption (315 kW) sur nappe phréatique : 83 % du besoin froid Appoint et secours : Groupe froid aérothermique (2 x 0,5 MW) : 17 % du besoin froid	**S3-Cref :** Groupe froid à compression (2 x 525 kW + 525 MW secours) aérothermie	**S3-Dref :** Groupe froid aérothermie : 10 x 100 kW
4	Chauffage de 20 bâtiments en zone H2b : 20 x 130 kW, soit 2,6 MW (logement neuf uniquement)	4,7 GWh de chauffage, secondaire de chaque sous-station à 50/40°C	**S4-RC :** Système principal : 8412 m² de collecteurs solaires capteur plan Stockage d'énergie saisonnier enterré : 583 sondes de 35 m pour échangeur thermique Secours : 6 chaudières gaz de 0,6 MW	**S4-Cref :** Chaufferie gaz : 2 x 1,3 MW (+ 1,3 MW de secours)	**S4-Dref1 :** Chaudières gaz : 20 x 130 kW
					S4-Dref2 : Panneaux solaires : 20 x 130 kW Secours et appoints : chaudière gaz : 20 x 130 kW

Cas	Cas d'étude	Energie à fournir	Systèmes étudiés	Systèmes centralisés de référence	Systèmes décentralisés de référence
11	Chauffage de 130 bâtiments anciens en zone H2b : 130*345 kW et 45 MW souscrit	67 GWh en régime 75/50°C	**S11-RC :** Système principal : doublet de géothermie profonde (1850 m de profondeur) redressé par 2 pompes à chaleur haute température de 18 MW 83% du besoin chaud Appoint et secours : 7*6 MW de chaudières installées 17% du besoin chaud	**S11-Cref :** Chaufferie gaz : 9 * 6 MW	**S11-Dref :** Chaudière gaz : 130 * 345 kW

Tableau 3-2 : Synthèse des cas d'étude industriels

Cas	Cas d'étude	Energie à fournir	Systèmes étudiés	Systèmes de référence
5	Procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h nécessitant une puissance froide de 2 MW	14,8 GWh de froid, régime 7/12°C	**S5-R :** Groupe froid a absorption (2 MW) avec captage sur nappe phréatique	**S5-Cref :** Groupe froid à compression (2 MW) avec captage sur nappe phréatique
6	Procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h nécessitant une puissance chaude de 250 kW	1,8 GWh de chaud, en régime 55/35°C	**S6-R :** Pompe à chaleur à ammoniac 250 kW	**S6-Cref :** Chaufferie gaz (250 kW)
7	Procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h nécessitant une puissance chaude de 1,7 MW	12 GWh de chaud, en régime 92/55°C	**S7-R :** Pompe à chaleur hybride absorption et compression (1.7 MW) alimentée en chaleur fatale, sur nappe phréatique	**S7-Cref :** Chaufferie gaz (1,7 MW)
8	Procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h nécessitant une puissance chaude de 1,1 MW et une puissance froide de 0,8 MW	3,9 GWh de chaud en régime 55/50°C et 5,7 GWh de froid en régime -11/-4°C	**S8-R :** Groupe froid avec de l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante	**S8-Cref :** Chaufferie gaz (1,1 MW) Groupe froid à compression (0,8 MW)
9	Procédé industriel fonctionnant en 2 x 8h nécessitant une puissance chaude de 2,0 MW	10 GWh de chaleur en régime 80/50°C	**S9-R :** Système principal : Centrale solaire thermique capteur plan (2,0 MW) : 53 % du besoin chaud Appoint et secours : Chaudière gaz (2.0 MW) : 46% du besoin chaud	**S9-Cref :** Chaufferie gaz (2,0 MW)
10	Procédé industriel fonctionnant en 2 x 8h nécessitant une puissance chaude de 1,0 MW	5 GWh de chaleur en régime 100/40°C	**S10-R :** Système principal : Centrale solaire thermique tube sous vide (1,0 MW) : 12 % du besoin chaud Appoint et secours : Chaudière gaz (1.0 MW) : 88 % du besoin chaud	**S10-Cref :** Chaufferie gaz (1,0 MW)

3.2 Eléments communs à tous les cas d'étude

3.2.1 Description des technologies de production de chaleur et de froid étudiées

Les 11 cas d'études analysés dans cette étude mettent en œuvre huit grandes familles de système de production de chaleur et/ou de froid. Le principe général de fonctionnement de chaque famille de système est présenté, ainsi que leurs principales caractéristiques.

3.2.1.1 Pompe à chaleur sur sondes géothermiques

Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur repose sur un cycle thermodynamique appliqué à un fluide frigorigène. Le groupe est composé des éléments suivants :

- Unité de compression ;
- Condenseur ;
- Unité de détente ;
- Evaporateur.

Le fluide frigorigène évolue dans un circuit fermé dans lequel il subit une compression, une condensation (à haute pression et haute température), une détente puis une évaporation (à basse pression et basse température). Il extrait des calories d'une source donnée (sonde géothermique sur boucle d'eau) lorsqu'il s'évapore et les cède à la source cible (réseau de chaleur) dans le condenseur lorsqu'il condense.

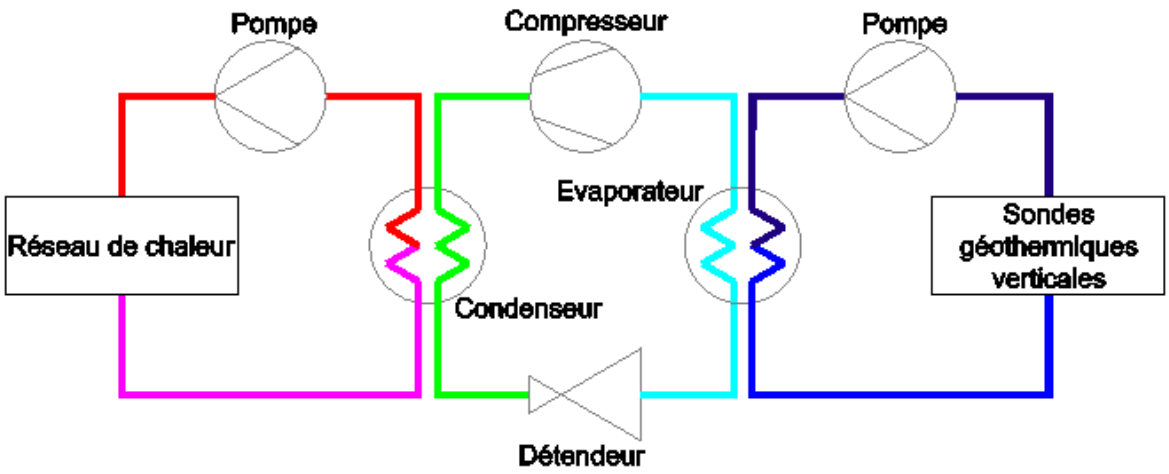


Figure 3-1 : Principe d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique

Dans ce cas, la source chaude est le réseau de chaleur et la source froide est la géothermie via des sondes géothermiques verticales.

En fonction de l'environnement et du besoin, les sources chaudes et froides suivantes peuvent être utilisées :

- Nappe phréatique,
- Sondes géothermiques horizontales (non utilisées ici et plus adaptées à l'habitat individuel pour climatiser ou rafraichir.
- Sonde géothermique verticale.

- Air ambiant (directement ou avec une boucle d'eau ouverte intermédiaire et un système évaporatif, groupe froid de réseau de chaleur),

- Réseau de chaleur ou réseau de chauffage,

- Réseau de froid ou réseau de climatisation.

Le coefficient de performance (COP) est défini comme le ratio de l'énergie fournie par le condenseur, c'est-à-dire les calories fournies à la source chaude sur le travail fourni (énergie électrique consommée) par le compresseur. Le COP constructeur normalisé pour ce type de technologie se situe entre 4 et 6. Il varie en fonction de la charge de la machine (coté réseau de chaleur) et surtout en fonction du taux de compression (rapport entre la pression de sortie du compresseur et la valeur d'entrée du compresseur).

Le COP, tout comme l'EER (équivalent en froid) sont basés à partir de données déclarées par différents fabricants et des données de fiche technique. Le modèle d'évolution du COP (ou EER) est ensuite ajusté afin de coller aux données des fiches techniques et fabricants.

Le fond chaleur a des critères d'éligibilité[4] sur le COP qui varient en fonction de la source.

Plusieurs techniques de compression existent sur les pompes à chaleur :
- Compresseurs à pistons : ce type de compresseur est généralement appliqué à des installations de petite taille (<1,5 MW) et présente un COP inférieur aux autres technologies ;
- Compresseurs à vis : ce type de technologie est appliqué pour des puissances jusqu'à environ 7 MW. Ils sont très bien adaptés à l'utilisation de l'ammoniac mais leur utilisation peut poser des problèmes de bruits ;
- Compresseurs centrifuges : il s'agit d'une technologie également répandue. Ces compresseurs s'adaptent à la variation de charge (jusqu'à 40%) et la puissance chaude peut atteindre jusqu'à environ 25 MW. Des avantages significatifs sont un plus faible encombrement et un plus faible coût de fonctionnement (ramené au MW).

Les fluides frigorigènes couramment utilisés sont :
- R134a (corps pur) ;
- R404A, R407c, R410a R507 (mélange) ;
- Ammoniac

L'utilisation des CFC (Chlorofluorocarbones) est désormais interdite (1995) dans de nombreux pays du fait de leur contribution à l'appauvrissement de la couche d'ozone et à l'effet de serre. L'utilisation des HCFC (Hydrochlorofluorocarbones) est également interdite (2015). Les HFC (Hydrofluorocarbones) sont actuellement utilisés de moins en moins et les fabricants s'orientent maintenant vers les fluides inorganiques (série des R700 avec l'eau R717, l'ammoniac R718 et le CO_2 R744) et les HFO (HydroFluoro-Oléfines) (série des R1233zd, R1234ze, R1234yf).

La pompe à chaleur est raccordée à un système de sondes, qui descend en profondeur dans le sol pour capter l'énergie géothermique. La plupart des forages réalisés pour chauffer des bâtiments descendent entre 50 et 200 mètres, pour exploiter une chaleur de 10 à 15°C – c'est de la géothermie "à basse température".

[4] http://www.fonds-chaleur.ademe.fr/

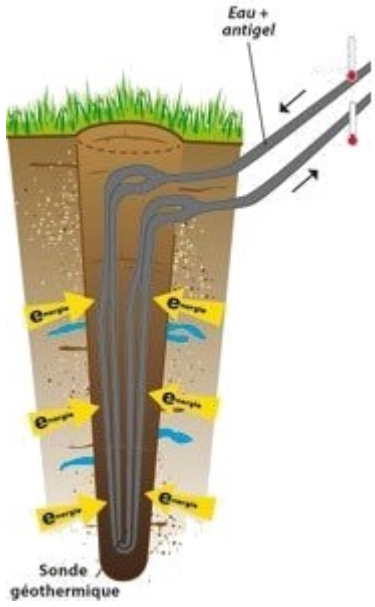


Figure 3-2 : Schéma d'une sonde géothermique

Limites de ce système :

Du fait de l'utilisation d'une pompe à chaleur, plus l'écart entre la température de la source froide (ici les sondes géothermiques) et la source chaude (ici le réseau de chaleur) est élevé, plus il est difficile d'obtenir une bonne efficacité du système et donc un COP (coefficient de performance) élevé. Ce type de système est donc plus intéressant avec une température de départ du réseau de chaleur basse température (50-60°C). Ce système est donc plus adapté pour des constructions neuves ou rénovées (chauffage fonctionnant avec des températures plus basse rendu possible par la réduction des déperditions).

De plus ce système a une emprise au sol importante à cause des nombreux forages nécessaires, il est donc plus adapté pour alimenter des quartiers en périphérie d'une ville, son implantation en centre-ville reste réalisable mais très complexe et plus coûteux (forages à réaliser sur la route, risque de surcoût important pour la dépollution des sols, risque de percement des réseaux existants).

3.2.1.2 Pompe à chaleur sur aquifère

Une pompe à chaleur sur aquifère fonctionne de la même manière que la pompe à chaleur sur sondes géothermiques. Les différences sont au niveau de la source froide utilisée.

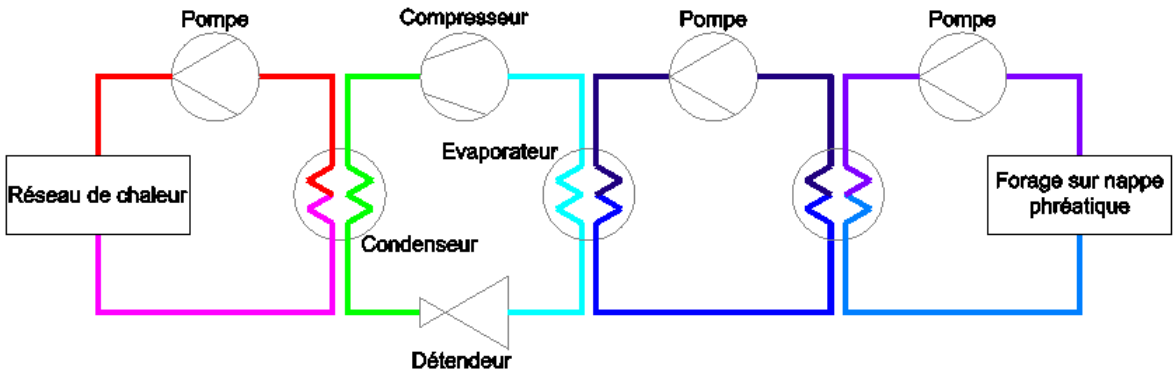


Figure 3-3 : Schéma d'une pompe à chaleur sur aquifère

Le système prélève des calories sur la nappe phréatique et les renvoie dans le réseau de chaleur. L'installation dédiée à la source froide fonctionne avec 2 types de forages/puits prélevant les calories dans la nappe :

- Puits de prélèvement d'eau de nappe d'une profondeur comprise entre 5 m et 50 m,
- Puits de rejet de l'eau de nappe (distance très dépendante des caractéristiques de la nappe, de la vitesse, de la température, de la perméabilité du sol).

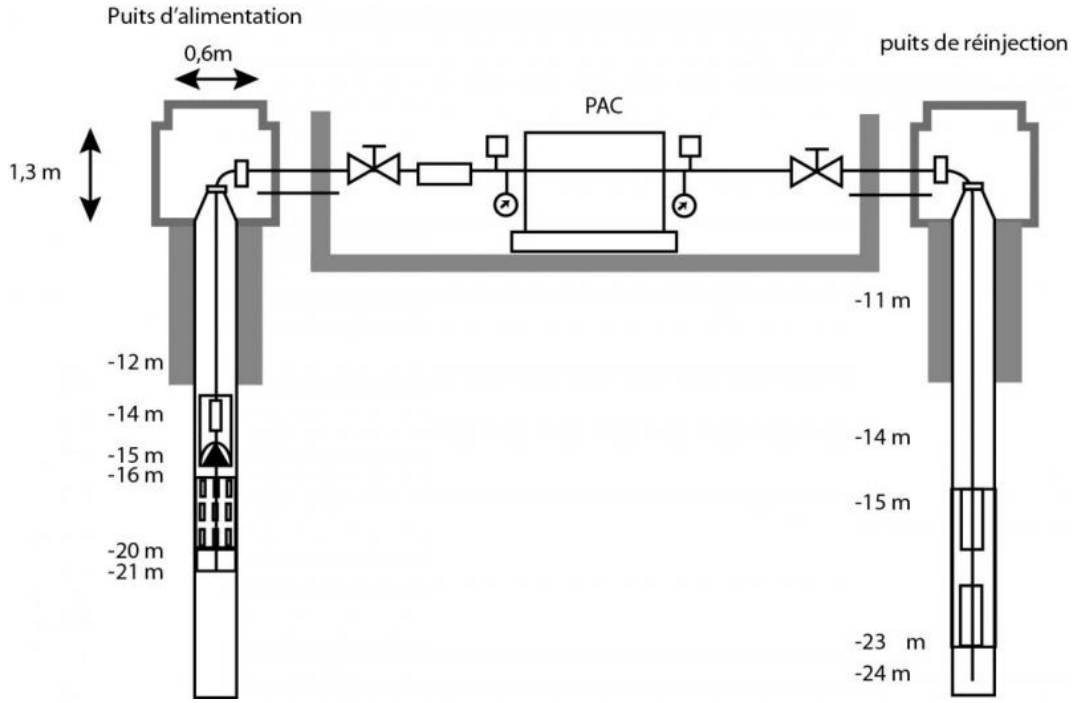


Figure 3-4 : Schéma d'un puits de prélèvement et de réinjection dans la nappe phréatique

Ce type de système dépend du site où il est mis en place. Les conditions pour avoir un système performant et peu coûteux sont les suivantes :

- Débit prélevable suffisant au regard de l'équilibre technico-économique, nombre de forage, diamètre, profondeur (le sous-sol doit être constitué de matériaux perméables type sable),
- Surface de terrain suffisante pour espacer les forages,
- Vitesse de nappe suffisante afin d'assurer un renouvellement de l'eau au regard du débit et nombre de puits (le système ne fonctionne pas avec les nappes stagnantes car il y aura un refroidissement local de la zone),
- Température de nappe suffisante (température de nappe moyenne d'une dizaine de degrés).
- Le prélèvement majeur d'eau sur la nappe doit être éloigné des forages existants afin de ne pas les rendre inutilisables (dossier qui doit faire l'objet de la validation des autorités compétentes type DREAL).

Le système peut aussi sur le même principe être utilisé en prélevant des calories sur d'autres sources comme une rivière, un fleuve, la mer, l'océan ou des eaux usées ce qui permet de ne pas avoir de forage à réaliser. Cependant ce type de système demande des dispositifs de captage et de filtration supplémentaires.

Limites de ce système :

Du fait de l'utilisation d'une pompe à chaleur, plus l'écart entre la température de la source froide (ici un aquifère) et la source chaude (ici le réseau de chaleur) est élevé, plus il est difficile d'obtenir une bonne efficacité du système et donc un COP (coefficient de performance) élevé. Ce type de système est donc plus intéressant avec une température de départ du réseau de chaleur faible (50-60°C voir plus bas (40°C) si seul le chauffage exploite cette chaleur). Dans la majorité des cas, ce système est actuellement mis en œuvre pour alimenter des constructions neuves ou rénovées.

De plus ce type de système, moins coûteux que de la géothermie sur sondes nécessite des prérequis :

- Forage sur nappe phréatique : emprise au sol importante pour installer les forages et demande aussi une nappe mouvante (comme la nappe d'Alsace par exemple) avec un niveau variant peu en fonction de la saison. Ceci est donc plus simple à mettre en œuvre pour une centrale de production située en périphérie de la ville et dans une région dans laquelle les agriculteurs puisent peu sur la nappe (pour éviter les variations de niveaux trop importantes). Ce type de forage reste cependant réalisable en milieu urbain dense (Paris, Lyon, Strasbourg…)

- Utilisation d'un cours d'eau : demande la proximité avec un cours d'eau et limite la température de rejet de l'eau (pour éviter la destruction de l'écosystème avec une eau trop froide).

- Utilisation d'un lac : demande à ce que le lac soit assez grand pour qu'il puisse évacuer l'énergie froide transmise en hiver

- Utilisation d'eau de mer : du fait de la taille de la ressource, la puissance froide à évacuer n'est pas limitante cependant cela nécessite d'étudier les courants afin d'éviter une eau trop stagnante (cas d'un port dans une crique) et de filtrer l'eau (pour enlever les coquillages, les cailloux, le sable, les boues…) ainsi que d'utiliser des matériaux compatibles (par exemple échangeurs en titane) avec l'eau chargée en sel.

- Utilisation d'eaux usées : demande en fonction de la technologie d'échangeur de filtrer les matières solides, visqueuses ou dangereuses ou alors de prévoir des systèmes de nettoyages afin de garder une bonne efficacité du système en limitant l'encrassement. Il est aussi possible de récupérer cette chaleur à la sortie des stations d'épuration (STEP) afin de ne pas avoir les problématiques de biofilm et d'encrassement.

3.2.1.3 Pompe à chaleur aérothermie

Une pompe à chaleur aérothermie fonctionne de la même manière que la pompe à chaleur sur sondes géothermiques ou aquifère. Les différences sont au niveau de la source froide utilisée, la pompe à chaleur prélevant les calories dans l'air ambiant.

L'avantage de ce système est de pouvoir être mis en place quasiment partout (problématique de pollution visuelle dans certains quartiers). Cependant son COP annuel est bien plus faible, notamment à cause de la période hivernale qui dégrade considérablement les performances et fait parfois appel à des résistances d'appoint en cas de gel trop important des échangeurs air/eau.

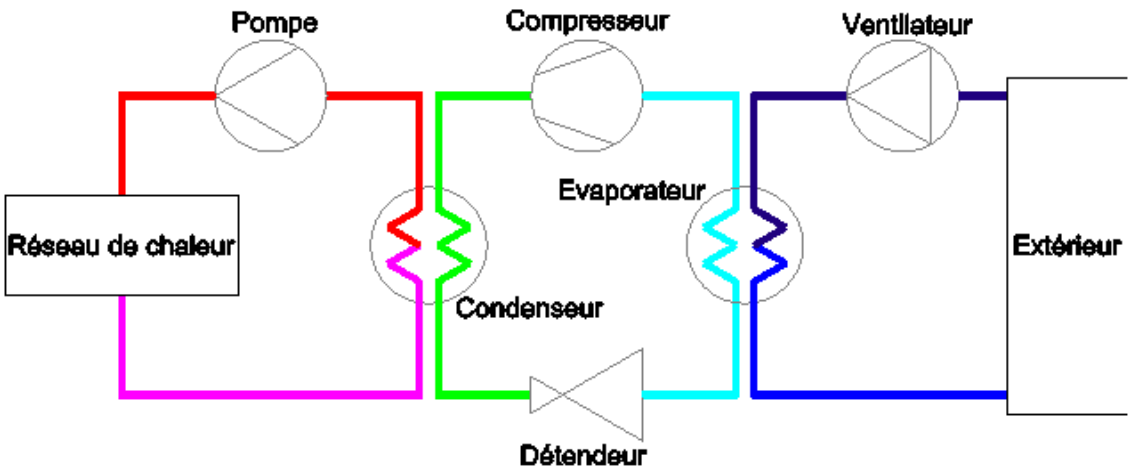


Figure 3-5 : Schéma d'une pompe à chaleur aérothermique

Il existe 2 types de systèmes pour faire de l'aérothermie :

- Utiliser une pompe à chaleur eau/eau et l'associer à un équipement comme un aéroréfrigérant (comme présenté sur le schéma ci-dessus) est peu courant du fait des problèmes de formation de givre sur l'aéroréfrigérant ;
- Utiliser une pompe à chaleur air/eau où le fluide frigorigène échange directement ses calories avec l'air (pas de circuit hydraulique) pour les puissances inférieures à 100 kW (problème de givre lui aussi présent).

Ce type de système est en général utilisé en secours ou pour limiter les coûts. Ce système a une efficacité réduite du fait des phases de dégivrage de l'échangeur d'air.

Il existe aussi un système de PAC air/air, utilisé en logement individuel (souvent sous forme de climatisation réversible). En France, ces systèmes sont très peu déployés dans les logements collectifs, et ne font donc pas l'objet de cette étude.

Limites de ce système :

Du fait de l'utilisation d'une pompe à chaleur, plus l'écart entre la température de la source froide (ici l'air extérieur) et la source chaude (ici le réseau de chaleur) est élevé, plus il est difficile d'obtenir une bonne efficacité du système et donc un COP (coefficient de performance) élevé. Ce type de système est donc plus intéressant avec une température de départ du réseau de chaleur faible (50-60°C). Ce système est donc plus adapté pour des constructions neuves ou rénovées et il doit souvent être assisté (en hiver) d'une résistance électrique.

3.2.1.4 Groupe froid à compression sur un réseau urbain

Les groupes froid (GF) à compression fonctionnent de la même manière que les pompes à chaleur au niveau technologique (cycle thermodynamique) à la différence que la source froide correspond au réseau urbain et que la source chaude correspond au rejet de la chaleur à l'extérieur (dans l'air, sur capteur géothermique, dans la nappe phréatique, dans une rivière, etc.).

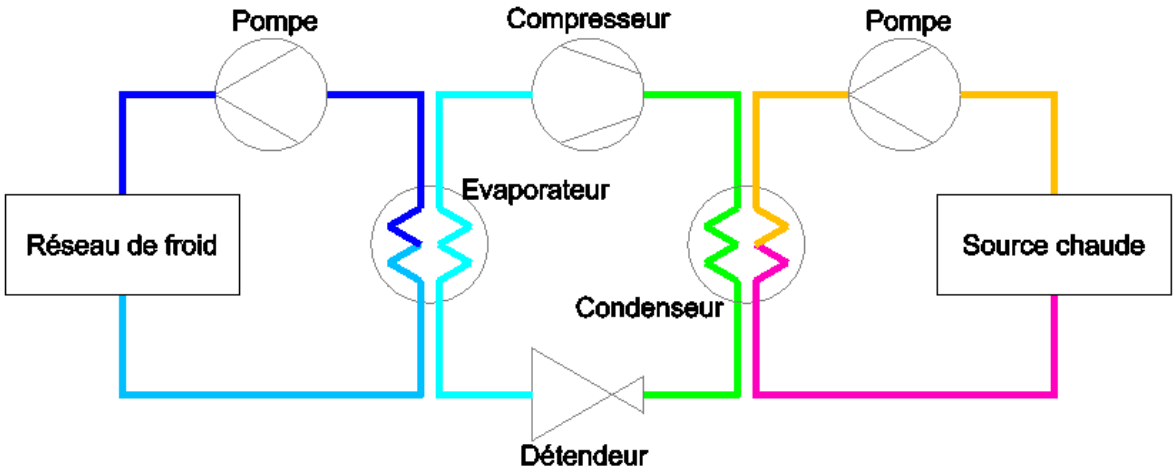


Figure 3-6 : Schéma groupe froid à compression

Les calories prélevées du réseau de froid peuvent, après évacuation côté condenseur, être dissipées soit dans l'atmosphère via de l'aérothermie, soit dans un autre milieu (lac, rivière, mer…) via un échangeur dédié.

Dans le cas de l'aérothermie, des tours aéroréfrigérantes ouvertes permettent d'optimiser l'efficacité du système en exploitant la chaleur latente d'évaporation de l'eau dans l'air. La chaleur rejetée par les tours aéroréfrigérantes peut être considérée comme de la chaleur fatale : elle peut être récupérée et injectée dans un réseau de chaleur à proximité.

Ce type de technologie à compression est aujourd'hui le plus utilisé sur le marché.

Ce type de technologie peut être considéré comme EnR car la chaleur est rejetée dans la nature au même titre que les pompes à chaleur, cependant, en fonction de l'énergie qui est utilisée pour produire l'électricité qui alimente le compresseur, le système peut être plus ou moins considéré comme énergie renouvelable.

Limites de ce système :

Ce système n'a pas spécialement de limitation en dehors des limitations générées citées précédemment.

3.2.1.5 Groupe froid à absorption

Les groupes froids à absorption permettent de produire du froid positif, et fonctionnent à partir d'une source d'énergie qu'est la chaleur et non une énergie électrique ou mécanique utilisée par les GF à compression. La source chaude peut se matérialiser sous diverses formes : vapeur d'eau, eau chaude, fumées de combustion, etc.

Leur utilisation est pertinente lorsqu'une source de chaleur est disponible à proximité et n'est pas valorisée, ou lorsqu'il est demandé de s'effacer du réseau électrique. Le couplage de ce type d'installation avec un réseau de chaleur urbain est répandu dans de nombreux pays comme en Allemagne, au Japon ainsi qu'en France.

Les groupes à absorption utilisent deux fluides différents (exemple du couple H20/LiBr) :

- Un fluide frigorigène : l'eau suit un cycle fermé dans lequel il va s'évaporer et se condenser. Le fluide frigorigène une fois évaporé est absorbé par le fluide nommé absorbant ;
- Absorbant : Le bromure de lithium est chargé d'absorber la vapeur du fluide frigorigène.

Un groupe à absorption simple effet est composé des éléments suivants :

- Générateur ou concentrateur : la chaleur porte à ébullition un mélange composé du fluide frigorigène (FF) et de l'absorbant. Le fluide frigorigène est libéré de l'absorbant sous forme de vapeur et envoyé au condenseur. Il reste une solution concentrée en absorbant qui est dirigée vers l'absorbeur après passage dans un échangeur. La température de la source chaude doit être située entre 65 et 140°C;
- Condenseur : arrivé sous forme de vapeur, le FF se condense au contact d'un échangeur via le transfert de calories à l'eau de refroidissement. Il retourne ensuite vers l'évaporateur ;
- Evaporateur : le FF liquide est détendu à une pression inférieure à celle du condenseur, pulvérisé et évaporé dans l'évaporateur. La vaporisation a lieu à une température d'environ 5°C ce qui permet le refroidissement de l'eau glacée circulant dans un faisceau de tubes à l'intérieur de l'évaporateur. Le FF vaporisé est ensuite admis dans l'absorbeur ;
- Absorbeur : la vapeur du fluide frigorigène est absorbée par la solution d'absorbant concentrée ayant une grande affinité avec le FF. L'eau de refroidissement est chargée de prélever la chaleur créée lors du phénomène d'absorption. La solution diluée d'absorbant est alors pompée vers le générateur ou concentrateur ;
- Echangeur de chaleur : il permet de limiter la quantité de chaleur à extraire de l'absorbeur par l'eau de refroidissement en permettant de refroidir la solution concentrée d'absorbant par la solution diluée provenant de l'absorbeur ;
- Le condenseur est refroidi par une source froide qui peut être de l'eau (eau de mer, rivière, etc.) ou une tour aéroréfrigérante par voie humide (tour humide, adiabatique, hybride, etc.).

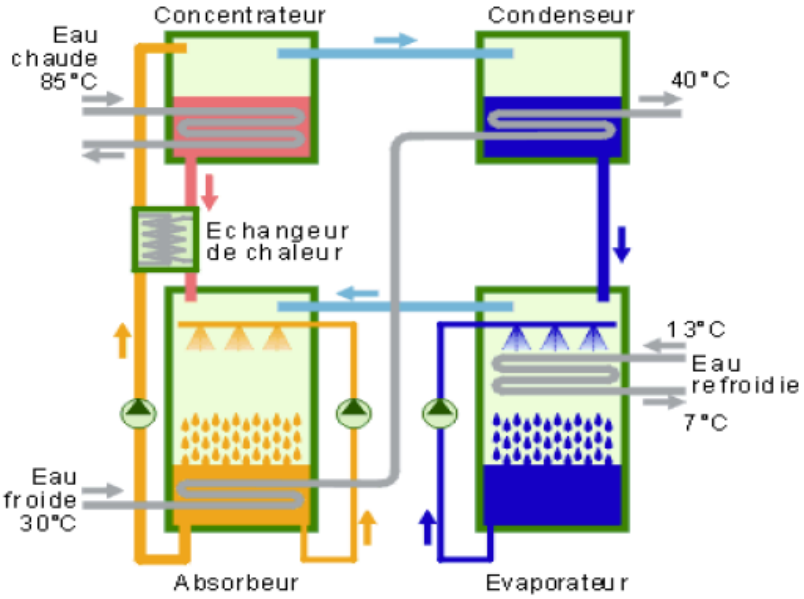


Figure 3-7 : Schéma d'un groupe à absorption

Il existe 2 couples principaux de fluide frigorigène + absorbant :

- Ammoniac + Eau (NH3/H2O) :
  - L'ammoniac est le fluide frigorigène ;
  - L'eau est le sorbant ;
  - Utilisable en froid industriel et climatisation ;
  - Alimentation énergétique possible avec du gaz (combustion) et de la vapeur.
- Eau + Bromure de Lithium (H_2O/LiBr) ;
  - L'eau est le fluide frigorigène ;
  - Le bromure de lithium est le sorbant ;
  - Utilisable en climatisation uniquement ;
  - Alimentation énergétique possible avec du gaz (combustion), de la vapeur et du solaire.

D'autres couples existent (NH3/LiNO3, LiBr/HO(CH2)OH) mais ils sont aujourd'hui uniquement utilisés à des fins expérimentales.

Aussi il existe 2 technologies, le simple effet et le double effet, ce dernier permet de récupérer de la chaleur supplémentaire du procédé d'absorption afin d'augmenter l'efficacité du cycle.

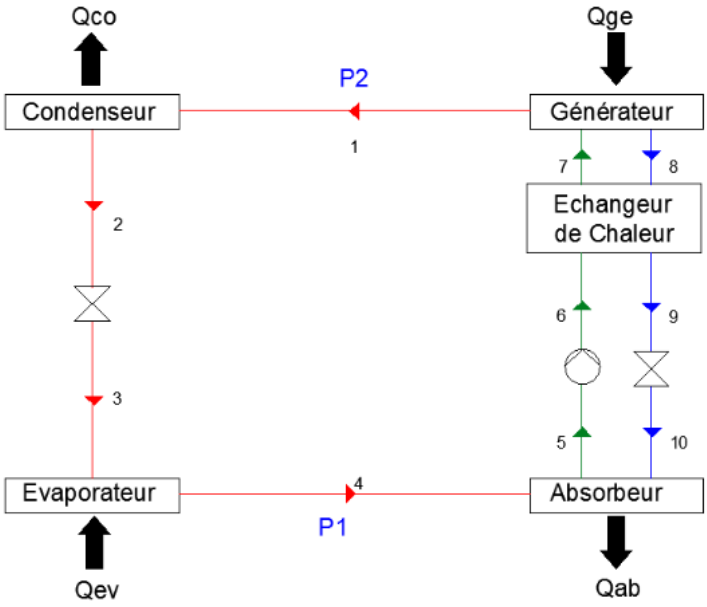


Figure 3-8 : Schéma d'une machine à absorption simple effet SARC

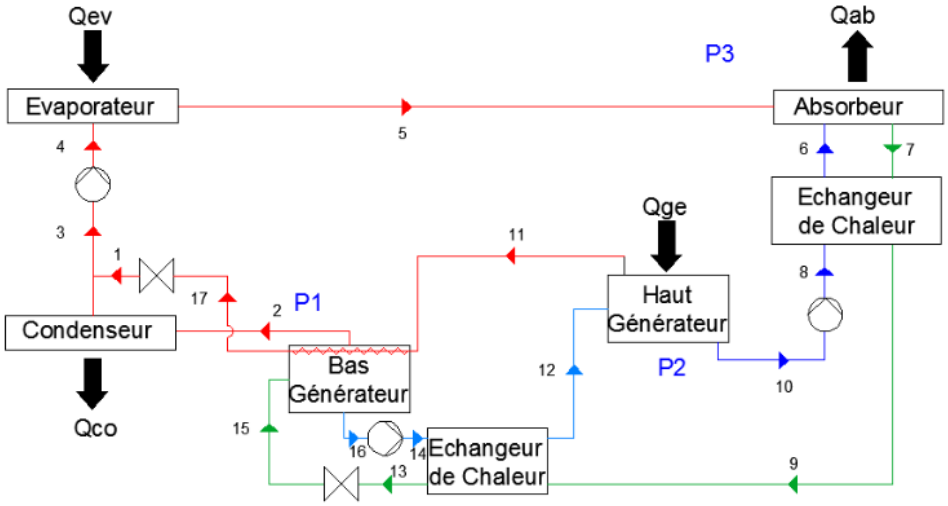


Figure 3-9 : Schéma d'une machine à absorption double effet DEAHT

L'efficacité d'un absorbeur simple effet, alimenté par exemple en chaleur à moins de 100°C est de l'ordre de 0.7-0.9. Pour 1 kWh de chaleur consommée, il y a production de 0,7 à 0.9 kWh de froid. L'efficacité d'un système à double effet est supérieure (1.1-1.4) mais demande un apport en chaleur à une température supérieure (~70°C en simple effet et ~150°C en double effet).

Le principal avantage de cette technologie est d'utiliser de la chaleur en été pour faire du froid alors que cette chaleur est en général non utilisée en été (chaleur fatale).

L'autre avantage est la solidité de ce type de système comparé à celui d'un compresseur (en général c'est l'élément qui tombe en panne en premier). Cet avantage vient du fait qu'aucune pièce mobile n'est nécessaire dans ce système (en dehors des vannes de régulation).

Limites de ce système :

Ce système a certaines limitations en plus des limitations générées citées précédemment pour les pompes à chaleur. Il demande notamment une source chaude haute température (70-100°C), cette source supplémentaire provient en général de chaleur fatale disponible, d'un brûleur gaz ou de solaire

thermique. Aujourd'hui, l'absorption est principalement utilisée quand une source de chaleur fatale est disponible et quasi gratuite. L'utilisation du solaire en climatisation solaire augmente trop l'investissement et diminue la rentabilité. Le gaz quant à lui est parfois utilisé mais plus comme un système de secours en cas de coupure électrique lorsque la fourniture d'électricité n'a pas une très bonne disponibilité ou un coût important (ce qui n'est pas le cas en France).

3.2.1.6 Thermo-frigo-pompes

Les thermo-frigo-pompes sont des machines frigorifiques qui fonctionnent de manière similaire aux pompes à chaleur et groupes frigorifiques à compression à la différence que la condensation se fait à plus haute température et pression. Le refroidissement au condenseur se fait par alimentation d'un réseau de chaleur urbain, d'un bâtiment ou d'un process industriel alors que le prélèvement de calories côté évaporateur se fait sur un réseau de froid urbain, un bâtiment ou un process industriel.

En été, un refroidissement d'appoint est souvent à prévoir si l'appel de chaleur est trop faible sur le réseau de chaleur. Pour un scénario industriel, le besoin en chaleur et en froid étant principalement dû aux charges thermiques du process, et est donc peu impacté par les conditions extérieures. De ce fait, la thermo-frigo-pompe est en général dimensionnée sans appoint.

Les thermo-frigo-pompes permettent de réaliser simultanément les fonctions froid et chaud et de réduire ainsi les investissements et l'encombrement. Néanmoins, elles ne permettent pas de répondre correctement à des demandes de froid et chaud déphasées notamment lorsque celles-ci sont très différentes en hiver et été. De plus le régime de température fourni côté chaud est plus bas (<65°C) que celui que pourrait fournir des pompes à chaleur haute température (<90°C).

Enfin, leurs performances énergétiques sont dégradées en raison d'une condensation du fluide frigorifique à plus haute pression côté condenseur.

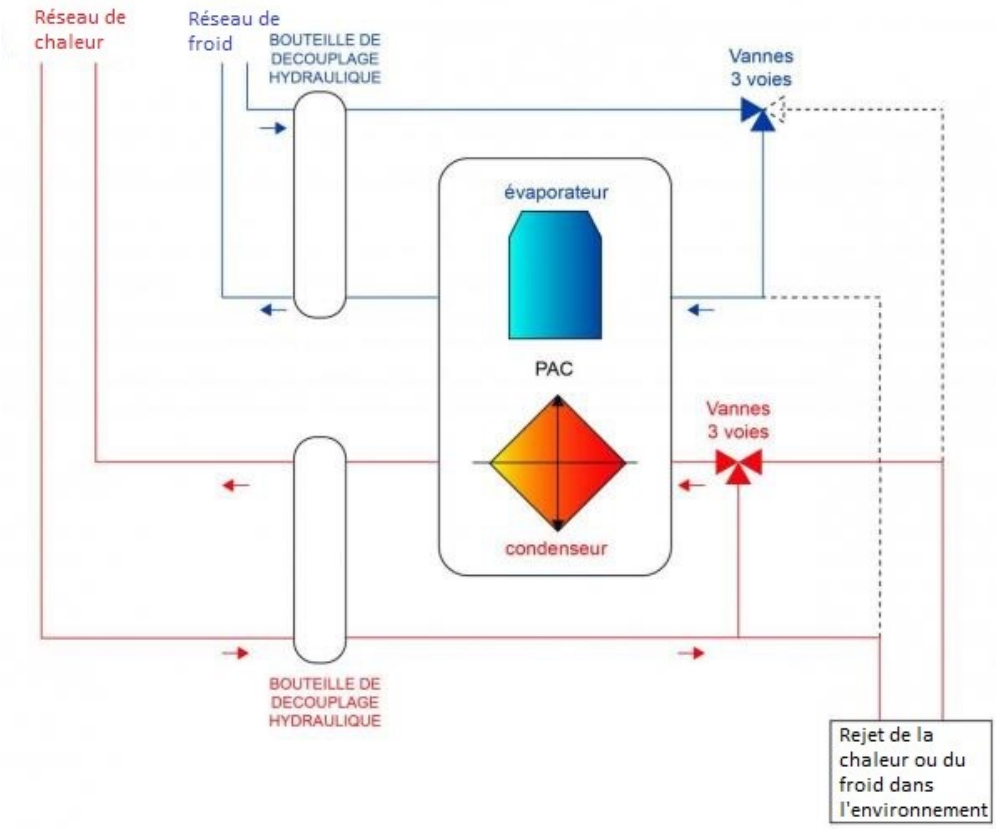


Figure 3-10 : Schéma d'une thermo-frigo-pompe[5]

Avantages et limites de ce système :

Ce système a les mêmes contraintes que les pompes à chaleur, c'est-à-dire la température de production de chaleur ainsi que les contraintes générées par la source froide (champ de sondes géothermiques, forages d'eau sur aquifère…).

Il a cependant l'avantage d'avoir une efficacité globale remarquable lorsque qu'il y a un besoin en chaleur et en froid simultané (mi saison où les logements sont chauffés et les bureaux sont refroidis, en hiver lorsqu'une patinoire ou des datacenters sont présents sur le réseau, en été lorsqu'une piscine est présente sur le réseau, procédés industriels…).

3.2.1.7 Généralités sur les machines fonctionnant sur la base d'un cycle thermodynamique

Efficacité et puissance absorbée :

La puissance de la source chaude (condenseur), la source froide (évaporateur) et la puissance électrique (compresseur) ou thermique haute température (concentrateur/brouilleur) sont liées par la formule suivante :

En production de chaleur :

$$COP = \frac{Pchaude}{Pelec\ ou\ Phaute\ température}$$

En production de froid :

[5] Source : https://www.alec-mb33.fr/wp-content/uploads/2018/12/7-1-Outils-daccompagnement-et-acteurs-vf-revu-ACM.pdf modifié

$$EER = \frac{Pfroide}{Pelec\ ou\ Phaute\ température}$$

En production de chaud et froid (thermo-frigo-pompes) :

$$Efficacité = \frac{Pfroide + Pchaude}{Pelec\ ou\ Phaute\ température}$$

Et enfin de façon plus générale

$$Pchaude\ (machine\ à\ compression) = Pfroide + Pelec$$

$$Pchaude\ (machine\ à\ absorption) = Pfroide + Phaute\ température + Pélec\ (négligeable)$$

Sur une machine à absorption froide, l'EER est proche de 1 voire inférieur à 1. En prédimensionnement la règle suivante peut être utilisée : Phaute température = Pfroide et Pchaude = 2 * Pfroide

Sur une machine à compression pour des COP et des EER élevés (>3.5) la relation suivante peut être utilisée en prédimensionnement : Pchaude ≈ Pfroide

Ces formules sont également utilisées en remplaçant les puissances par les énergies annuelles cumulées afin de calculer les efficacités annuelles.

3.2.1.8 Solaire thermique

Le principe d'une centrale solaire thermique est de chauffer de l'eau grâce au rayonnement solaire. La problématique majeure de ce système est l'intermittence journalière et l'intermittence saisonnière qui limitent le taux de couverture

Afin d'augmenter la couverture énergétique du solaire un stockage saisonnier pourra être mis en place. Il existe plusieurs types de stockage :

- Le TTES (tank thermal energy storage);
- Le PTES (pit thermal energy storage) ;
- Le BTES (borehole thermal energy storage);
- Le ATES (aquifer thermal energy storage);
- Le stockage saisonnier à membrane souple ;
- Les stockages avec des procédés nouveaux :
    - Chaleur latente ;
    - Absortion ;
    - Adsorption ;
    - Chimique.

Afin d'augmenter le niveau de chaleur du stockage, une pompe à chaleur peut être installée afin d'obtenir des températures élevées. Ce type de système vient également souvent en complément d'un système de chaudière bois. Le cadre actuel de l'étude exclut les chaudières bois, celles-ci ne pourront donc pas être utilisées en système complémentaire.

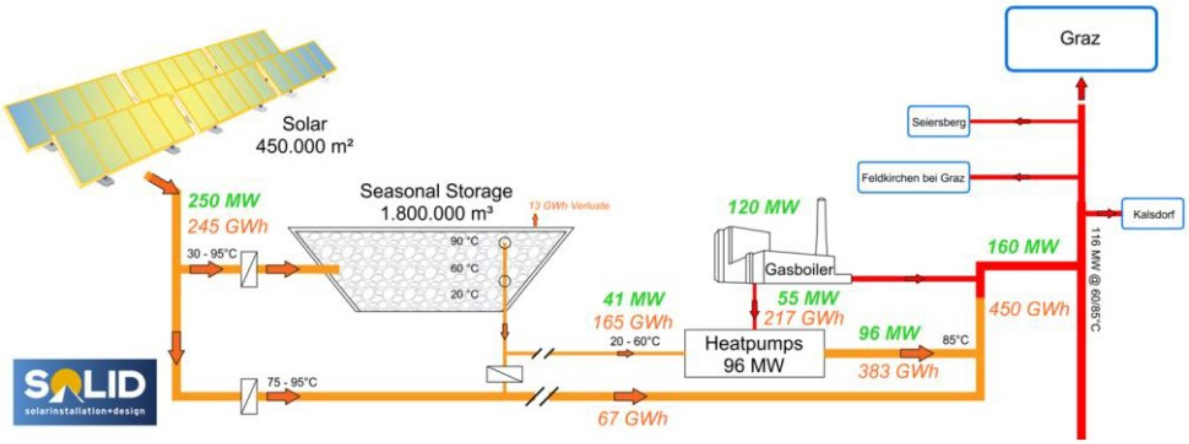


Figure 3-11 : Schéma de la centrale solaire Big Solar Graz (Autriche) (SDHp2m)

Il existe différents types de panneaux solaires pour récupérer l'énergie solaire :

- Les capteurs plans vitrés, ils ont un coût plus élevé, mais permettent de produire des températures plus élevées. Cependant, ils sont moins efficaces en basse température. Deux types de technologie existent :
  - Les capteurs plans simple vitrage ;
  - Les capteurs plans double vitrage limitant mieux les pertes thermiques ;
- Les capteurs sous vide, ils ont le coût le plus élevé mais limitent considérablement les pertes de chaleur en maintenant les tubes où circule le fluide caloporteur ainsi que la surface absorbante dans un tube sous vide. Il n'y a ainsi plus d'échange de chaleur par convection entre les tubes d'eau et l'extérieur. Seuls subsistent les échanges thermiques de chaleur par rayonnement (solaire). Ce type de capteur permet d'atteindre des températures plus élevées.

Les plages d'utilisation des différents types de systèmes en fonction de la température moyenne du réseau sont les suivantes :

- Température entre 50°C et 80°C : capteur plan simple vitrage (utilisation pour la production d'eau chaude sanitaire ou un appoint chauffage) ;
- Température entre 70°C et 100°C : capteur plan double vitrage (utilisation pour du chauffage) ;
- Température entre 90°C et 120°C : capteur plan à tube sous vide (préchauffage d'eau) ;

Des régimes de températures encore plus élevés (jusqu'à 1000°C) peut être atteints grâce à certaines technologies de capteurs solaire (solaire à concentration, tour solaire), qui ne font pas l'objet de cette étude et qui ne sont pas présentées ici.

Les deux technologies étudiées dans le cadre de cette étude seront les capteurs plans double vitrage et les capteurs sous vide.

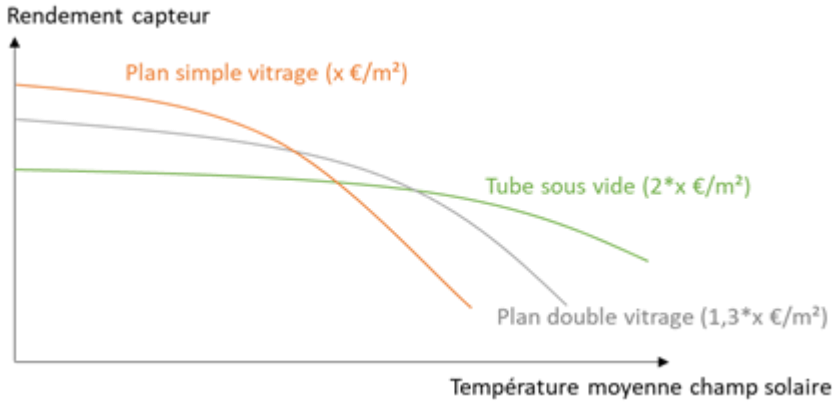


Figure 3-12 : Comparaison des capteurs solaires thermiques

Avantages et limites de ce système :

Les principales limites concernent le besoin en place disponible pour les champs de capteur solaire thermique et pour le stockage ainsi que la maitrise de l'énergie en période estivale avec la gestion des surchauffes.

Une autre des limites concernent la localisation du champ de capteur solaire. Celui-ci doit être bien situé, sans masque important, ne pas avoir de source de poussière à proximité (pour limiter le nettoyage si les vents dominants sont défavorables).

Le principal avantage est que le coût variable de ces systèmes sont extrêmement faibles. Une fois l'investissement initial réalisé, l'énergie produite est quasiment gratuite (hors maintenance).

3.2.1.9 Chaudière gaz

La chaudière gaz n'est pas considérée comme un système renouvelable dans cette étude car elle brûle un gaz conventionnel. Cependant cet équipement s'il est associé à du bio gaz, comme cela pourrait l'être avec un méthaniseur fonctionnant sur les déchets industriels ou agricoles à proximité, pourrait être considéré comme renouvelable.

Le principe d'une chaudière gaz est de brûler du gaz et récupérer l'énergie de cette combustion pour chauffer de l'eau. Ce type de système se décompose en 3 types de technologie avec chacun son rendement propre :

- Les chaudières classiques étaient avant (~2005-2010) majoritairement utilisées du fait de leur faible coût. Elles sont aujourd'hui utilisées quand l'apport des autres types de technologie n'est pas exploitable (température de retour d'eau trop importante) ;
- Les chaudières basse température qui fonctionnent comme des chaudières classiques, les échangeurs sont néanmoins plus grands afin de récupérer plus d'énergie sur les fumées sans pour autant les faire condenser ;
- Les chaudières à condensation fonctionnent comme des chaudières classiques mais abaissent au maximum la température des fumées ce qui a pour effet de faire condenser celles-ci et ainsi de récupérer la chaleur latente de condensation des fumées. Ce type de chaudière est utilisé lorsque le retour d'eau de chauffage est à une température inférieure à 50°C ce qui permet de faire condenser les fumées.

Aujourd'hui les chaudières à condensation se sont démocratisées avec des réseaux basse température dans les immeubles, ce qui entraine un marché où le coût et la disponibilité d'une chaudière à condensation sont plus intéressants qu'une chaudière basse température.

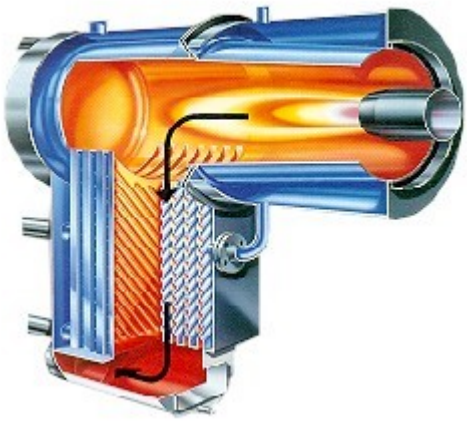


Figure 3-13 : Schéma d'une chaudière à condensation

Deux systèmes d'échangeur eau / fumée existent :

- Echangeur à tubes d'eau : le système consiste à faire circuler l'eau dans les tubes de la chaudière et les fumées circulent autour des tubes ;
- Echangeur à tubes de fumées : le système consiste à faire circuler les fumées dans les tubes et l'eau circule autour de ces tubes.

En fonction de la technologie, la chaudière à plus ou moins d'inertie et donc aussi de réactivité.

Le rendement d'une chaudière peut être donné sur le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) ou le PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur), le PCI correspond à la chaleur maximale générée par la combustion du gaz avant de faire condenser les fumées et le PCS correspond à la chaleur maximale générée par le gaz et la condensation de la totalité de l'eau contenue dans les fumées. Dans le cas des chaudières à condensation, il est donc possible d'avoir un rendement sur PCI supérieur à 100%, puisqu'elles permettent de récupérer une part de l'énergie contenue dans les fumées. Le rendement sur PCS ne peut cependant jamais dépasser 100%.

Pour exemple :
- Un rendement d'une chaudière classique de 90% sur PCI équivaudra à un rendement de 81% sur PCS
- Un rendement de 97% sur PCS équivaudra à un rendement de 106,7% sur PCI ;
- Le rendement maximum en gaz étant en fonction des gaz d'environ 111% sur PCI.

Limites de ce système :

La principale contrainte de ce système est générée par la diffusion des fumées dans l'atmosphère. Cette contrainte demande des distances d'éloignement vis-à-vis des bâtiments et ouvrages à proximité ainsi que la possibilité de mettre en place une cheminée de grande hauteur (dont la hauteur dépend également de la hauteur des bâtiments à proximité).

3.2.2 Caractéristiques communes à tous les cas d'étude

3.2.2.1 Localisation

Pour tous les cas d'étude à l'exception du cas d'étude 4, on suppose que les besoins à fournir sont situés en zone H2b, suivant le zonage climatique de la RT2012. Cette zone est considérée comme moyenne au sens de la RT2012 car le coefficient CEP max de la RT2012 n'y est pas corrigé et est toujours de 50 kWh/m²/an (coefficient Mcgéo de 1 dans la RT2012). Les hypothèses spécifiques utilisées pour le cas d'étude 4 sont décrites au § 3.6.

Cette zone climatique correspond aussi à un ensoleillement moyen représentatif de la France, soit entre 1200 et 1450 kWh/m² par an. Des zones avec un meilleur ensoleillement existent (sud de la France, Corse, etc.) mais celles-ci restent restreintes par rapport au reste de la France.

Cette localisation permettra de pouvoir facilement extrapoler les résultats à d'autres localisations, par exemple si un cas solaire est équivalent à un cas conventionnel dans notre étude, le cas solaire sera plus intéressant dans le sud de la France et inversement dans le nord de la France. De plus cela permet d'obtenir une neutralité dans les résultats sans favoriser une technologie plus qu'une autre.

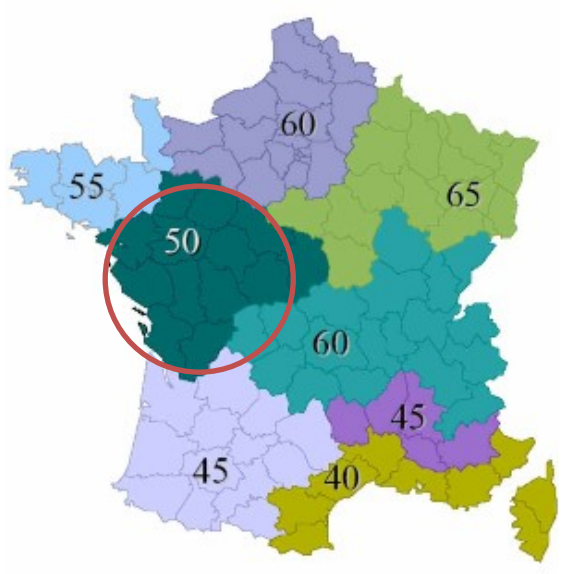


Figure 3-14 : Carte des zones climatiques au sens de la RT2012 (coefficient CEP en kWh/m2/an)

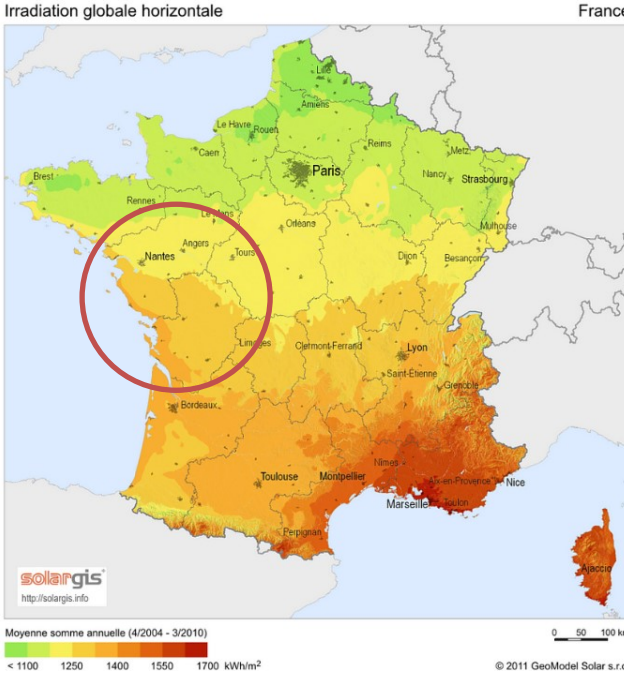


Figure 3-15 : Carte de l'ensoleillement extrait de Solargis

3.2.2.2 *Années de référence*

Les besoins de chauffage et de froid auxquels doivent répondre les systèmes étudiés dans chaque cas d'étude ont été estimés à partir de données réelles de consommations. Dans le cas des réseaux urbains, les besoins peuvent varier de manière significative d'une année sur l'autre, en fonction des températures hivernales en particulier. L'indice de rigueur climatique [7] est couramment utilisé pour caractériser la rigueur du climat pour une année donnée : une valeur supérieure à 1 indique que l'année a été plus froide que la moyenne. Inversement, une valeur inférieure à 1 indique que l'année a été plus chaude que la moyenne. La Figure 3-16 présente l'évolution de l'indice de rigueur climatique en France métropolitaine entre 1970 et 2018.

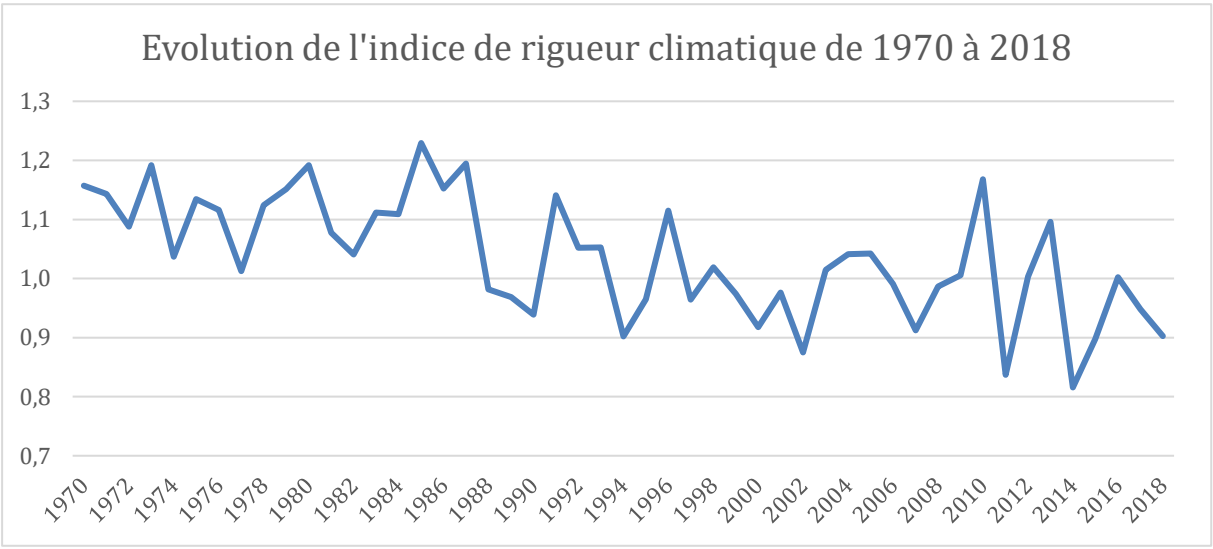


Figure 3-16 : Evolution de l'indice de rigueur climatique en France

On observe une grande variabilité de l'indice d'une année sur l'autre, ainsi qu'une tendance générale à la baisse, qui traduit le réchauffement climatique que connait le monde actuellement. Si la tendance moyenne observée sur la période 1970 – 2018 se poursuivait dans les prochaines décennies, l'indice de rigueur climatique pourrait baisser jusqu'à 0,85 en moyenne à l'horizon 2050.

Selon l'année considérée, la chaleur nécessaire au chauffage d'un même logement (et par la même occasion les impacts environnementaux associés à la production de cette chaleur) peut varier de manière importante. Le choix des données de consommation est donc susceptible d'avoir une influence importante sur les résultats de l'étude.

L'année de référence choisie n'est pas nécessairement la même selon les cas d'étude considéré. Cependant, dans tous les cas, les données utilisées correspondent à une année avec un indice de rigueur climatique égal à 1 à +/-6 %. Sur cette base, les années retenues sont les suivantes (en vert) :

Tableau 3-3 : Rigueur climatique nationale (source : calcul SDES d'après les données Insee et Météo France) de 2000 à 2009

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Indice de rigueur climatique	0,92	0,98	0,88	1,01	1,04	1,04	0,99	0,91	0,99	1,01
% de variation	8 %	2 %	12 %	1 %	4 %	4 %	1 %	9 %	1 %	1 %

Tableau 3-4 : Rigueur climatique (source : calcul SDES d'après les données Insee et Météo France) de 2010 à 2017

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Indice de rigueur climatique	1,17	0,84	1,00	1,10	0,82	0,90	1,00	0,95	0,90	0,92
% de variation	17 %	16 %	0%	10 %	18 %	10 %	0 %	5 %	10 %	7,6 %

En faisant ce choix, la validité temporelle de l'étude est limitée, dans le sens où les besoins de chauffage pourraient être plus faible en France métropolitaine à l'avenir.

Du fait de la disponibilité des données, le choix des années de simulation peut différer entre les cas d'études. Cependant, nous avons sélectionné des années avec un indice de rigueur climatique similaire (proche de 1).

Pour le cas d'étude 11, celui-ci étant basé sur une installation bien particulière et les consommations des équipements étant en grande majorité relevées, l'année qui a été utilisée est l'année 2019. Cette année a été choisie du fait de la disponibilité des données (installation en fonctionnement avec une disponibilité des données de 2019 à mi 2020 avec une absence de nouveaux gros raccordements de clients sur la période de 2019).

3.2.2.3 Bâtiments type représentatifs des données de consommation à titre informatif

Afin d'illustrer au mieux les différents cas d'étude un détail des typologies de bâtiment prises en compte a été réalisé.

Cette description **est uniquement à but informatif**. Les simulations ont été basées sur **des données réelles de consommation**, les bâtiments ont été regroupés dans de grands groupes et séparés entre anciens et nouveaux sur la base des données disponibles pour chaque client (âge de l'équipement de chauffage existant, âge du bâtiment, vue du bâtiment depuis la rue, historique des vues satellites…).

Les courbes de consommation ont été créées à partir de la puissance totale appelée (au pas horaire), le mix des consommations d'un grand nombre de bâtiments permet d'être représentatif de la zone climatique et de garder dans certaines limites la représentativité à l'échelle nationale.

Le nombre de client a été définie comme identique au nombre de bâtiment définie dans chaque scénario.

Ce détail des profils d'utilisation a été fait à des fins d'illustration et afin de dimensionner le réseau de chaleur, le calcul final des consommations a été réalisé à partir de courbes de demande en chaleur et en froid réelles et non des simulations sur la base de ces profils.

Du fait de l'utilisation de données réelles pour estimer les consommations, les caractéristiques choisies pour les bâtiments sont représentatives du marché actuel, au moment de la rédaction de cette étude. Dans les mois qui viennent, la nouvelle Réglementation Environnementale 2020 devrait entrer en vigueur, avec une exigence renforcée en matière d'efficacité énergétique. Les puissances appelées pour les bâtiments neufs devraient donc être plus faibles par rapport aux bâtiments modélisés dans l'étude.

Dans une certaine mesure, les résultats obtenus peuvent êtres extrapolés à des bâtiments plus performants :

- Du point de vue du gestionnaire de réseau, c'est la puissance à délivrer à chaque sous-station qui est importante. Des bâtiments mieux isolés consommeront moins d'énergie, et il sera donc possible de chauffer davantage de logements avec la même production ;
- A l'inverse, la rénovation des bâtiments existants alimentés peut faire baisser sa densité énergétique, et augmenter l'impact environnemental par kWh produit.

Logement collectif neuf

Les logements neufs sont considérés sur la base des critères ci-dessous :

- Respect de la RT2012 ou de la RT2005 avec le label BBC ;
- Chauffage possible sur un régime 35/40°C ;
- Surface moyenne par logement : 70 m² ;
- Hauteur sous plafond : 2.5 m ;
- Consigne de chauffage[6] à 19°C ;
- Inertie : moyenne ;
- Puissance de chauffage : 2.5 kW ;
- Puissance de relance : 0.5 kW ;
- Puissance totale de chauffage : 3 kW/Logement.
- Température de référence min : -5°C
- Besoin froid considéré comme nul. Ceci est justifié par la RT2012 qui permet la climatisation uniquement dans les cas suivants :
    - Compensation en réduisant les autres consommations (chauffage, ventilation…) afin de ne pas dépasser les 50 kWh/m2$_{SHONRT}$/an modulés en fonction de la localisation et des caractéristiques du bâtiment,
    - Classement du bâtiment en CE2 (bruit important empêchant l'ouverture des fenêtre),
    - Ainsi la RT2012 pousse à privilégier la conception bioclimatique du bâtiment et la ventilation naturelle en cas de forte chaleur.

[6] Les courbes de consommation sont issues de données réelles dont dispose Tractebel. La consigne de chauffage donnée ici est une consigne théorique. Selon l'expérience de Tractebel, la consigne réelle de chauffage est souvent plus élevée, ce qui entraîne une consommation réelle supérieure à la consommation théorique. Les données utilisées dans cette étude sont des données réelles.

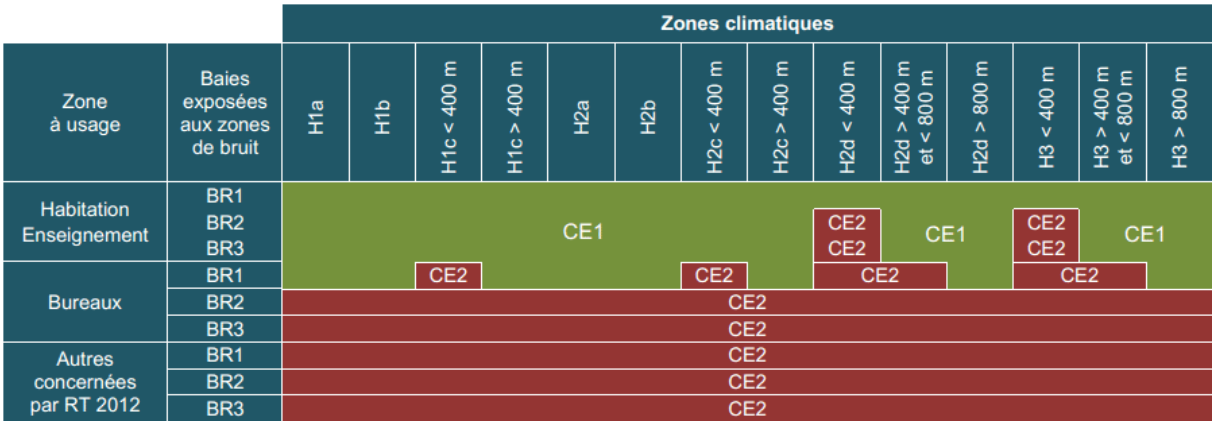


Figure 3-17 : Classement CE1 CE2 selon la RT2012

Logement collectif ancien

Les logements anciens sont considérés sur la base des critères ci-dessous :

- Immeuble des années 80 ;
- Chauffage radiateur fonte immeuble ;
- Surface moyenne par logement : 100 m² ;
- Hauteur sous plafond : 3 m ;
- Consigne de chauffage[6] à 23°C ;
- Inertie : faible ;
- Puissance de chauffage : 11.6 kW ;
- Surpuissance : 0.4 kW ;
- Puissance totale logement : 12 kW.
- Température de référence min : -5°C
- Besoin froid considéré comme nul, justifié par l'inertie thermique et les contraintes architecturales et acoustiques (bruit et impact visuel d'un climatique type split avec un module extérieur qui limite dans la pratique la mise en place d'un climatiseur).

Les logements collectifs anciens se révèlent non utilisés dans les cas d'étude 1 à 4 du fait de leur besoin en chaleur haute température et du fait que les systèmes de base présentés dans ce rapport sont des systèmes encombrants. Les logements anciens font cependant partie du parc chauffé par le réseau de chaleur du scénario S11. Cependant il existe des productions de chaleur renouvelable parfaitement adaptées pour la haute température comme les chaudières biomasse, celles-ci sont cependant exclues de ces études.

Bâtiment public

Les bâtiments publics sont considérés sur la base des critères ci-dessous :

- Parc mélangeant des bâtiments récents ou rénovés en majorité et des bâtiments anciens ;
- Parc composé des types de bâtiments suivants :
  - Hôtel de ville ;
  - Conseil général ;
  - Conseil régional ;
  - Médiathèque ;
  - Bibliothèque ;
  - Centre hospitalier ;
  - Etablissement d'enseignement ;
- Surface moyenne d'un bâtiment : 4000 m² ;
- Puissance moyenne par bâtiment : 400 kW chaud et 350 kW froid.
- Température de référence min pour production chaleur : -5°C

Bureaux neufs

Les bureaux neufs sont considérés sur la base des critères ci-dessous :

- Respect de la RT2012 ;
- Chauffage 35/40°C possible ;
- Climatisation 7/12°C possible ;
- Surface moyenne par bâtiment 3000 m² ;
- Hauteur sous plafond 2.5 m ;
- Consigne de chauffage[6] à 19°C ;
- Puissance moyenne par bâtiment 200 kW chaud et 200 kW froid ;
- Température de référence min pour production chaleur : -5°C.

Bureaux anciens

Les bureaux anciens sont considérés sur la base des critères ci-dessous :

- Rénovation des bureaux ayant été faite avec la RT existante ou bâtiment construit en respectant la RT2005 ;
- Chauffage 35/40°C possible ;
- Climatisation 7/12°C possible ;
- Surface moyenne par bâtiment 3000 m² ;
- Hauteur sous plafond 2.5 m ;
- Consigne de chauffage[6] à 19°C ;
- Puissance moyenne par bâtiment 500 kW chaud et 500 kW froid.

Industrie 3x8

Les industries 3*8 sont considérées sur la base des critères ci-dessous :

- Utilisation de la puissance quasi uniquement à des fins industrielles comme utilités et procédés ;
- Fonctionnement 24/24h ;
- Utilisateurs types :
    - Agroalimentaire (préparation, refroidissement post cuisson, surgélation, conservation, etc.) ;
    - Pharmaceutique ;
    - Chimie ;
    - Mécanique (automobile, naval, aéronautique) ;
- Puissance quasi constante en fonction du cas d'étude.

Industrie 2x8

La différence entre les industries qui fonctionnent en 2x8 et les industries qui fonctionnent en 3x8 concerne les horaires de fonctionnement. En 3x8, l'industrie fonctionnera 24h/24 et 7j/7 avec une rotation de 3 équipes de 8h chacune. En 2x8, 2 équipes de jours se suivent, travaillant chacune 8h et cela 7j/7. Les besoins du procédé de production ont été définis comme quasi constant avec une légère variation saisonnière et une part d'aléatoire afin de prendre en compte les variations dues aux cycles des process de production.

3.2.2.4 Procédure pour définir les courbes de demande

Les courbes de demande heure par heure en chaud/froid pour les différents types de bâtiments décrits ci-dessus et les répartitions associées sur un réseau de chaleur ou de froid sont basées sur des projets types déjà réalisés. Cette démarche permet d'obtenir la courbe de charge mixant les usages pour chacun des cas d'étude.

Par exemple, pour le cas d'étude 2 ayant une puissance de 1 MW en chaleur, les puissances types souscrites par type de bâtiment seraient les suivantes :

- Puissance maximale logement neuf : 40% x 1 MW : 0.4 MW
- Puissance maximale bureau neuf : 60% x 1 MW : 0.6 MW

Ce calcul est effectué heure par heure, comme dans l'exemple suivant :

Tableau 3-5 : Exemple de répartition des consommations

Heure	Puissance logement neuf / Puissance maximale logement neuf $P_{Logement}$	Puissance bureau neuf / Puissance maximale bureau neuf P_{Bureau}	40% logement neuf + 60% bureau neuf P_{charge}	Ajustement par rapport à la puissance maximale P_{charge} / Max (P_{charge})	Puissance consommée scénario en MW
	Données disponibles à partir de consommations réelles	Données disponibles à partir de consommations réelles	Calcul	Ajustement	Résultat utilisable pour un scénario
	A	B	C=A*40%+B*60%	D=C/MAX(C)	E=D*1 MW
1	50%	30%	38% (0.5*0.4+0.3*0.6)	45% (0.38/0.84)	0.45
2	60%	100%	84%	100%	1.00
3	100%	10%	46%	55%	0.55
4	90%	50%	66%	79%	0.66
Maximum sur la période considérée	100%	100%	84%	100%	1.00

L'ajustement par rapport à la puissance maximale sert à retrouver une puissance maximale de 100% après le mix des puissances.

3.2.2.5 Caractéristiques des équipements mutualisés entre cas d'étude

Longueur des réseaux et pertes

Les longueurs de réseau pour chaque cas d'étude sont fixées à partir des données statistiques de l'enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid réalisée par la FEDENE [4]. Les longueurs de réseau utilisées dans les cas d'étude sont estimées en considérant que la longueur du réseau est proportionnelle à l'énergie distribuée annuellement :

- 0, 215 mètres linéaires par MWh chaud annuel (2017) (densité de chaleur minimale de 4,6 MWh/ml/an correspondant à la moyenne française) (est passé à 0,228 en 2018) ;
- 0,202 mètres linéaires par MWh froid annuel (densité de froid minimale de 4,9 MWh/ml/an correspondant à la moyenne française) (est passé à 0,192 en 2018).

Sur base des retours de l'ADEME et de notre retour d'expérience, les pertes type d'un réseau de chaleur ou de froid seront prises à une valeur de 5 %. Ces pertes correspondent aux pertes thermiques dans le sol et à l'extérieur. Malgré ces pertes non négligeables en matière d'énergie, les variations de température dans le réseau sont minimes. Par souci de simplification de la modélisation énergétique, ces variations de températures n'ont pas été prises en compte, notamment dans le calcul du COP des pompes à chaleur.

Un simple calcul de coin de table permet de justifier cette hypothèse :

- Supposons un régime d'eau 60/50°C en sous-station, soit un ΔT de 10°C ;
- Supposons des pertes énergétiques ΔQ_{pertes} de 5% ;
- On peut calculer la différence de température due aux pertes thermiques dans le réseau avec la formule $\Delta T_{pertes} = \Delta Q_{pertes} * \Delta T = 0.5°C$ (indépendamment de la puissance du réseau).
- Ainsi, pour maintenir un régime en 60/50°C à la sous-station, l'eau doit être chauffée à 60,25°C au départ, et elle revient à la chaufferie à 49,75°C
- On constate que le régime d'eau coté production est équivalent au régime d'eau en sous-station, le rendement des machines ne sera donc pas impacté par cette variation de

température. En revanche, la puissance supplémentaire due aux pertes thermiques (~ 5%) est bien prise en compte pour la production de chaleur.

Dimensionnement des puits pour les captages sur nappe

Des captages sur nappe sont nécessaires pour plusieurs PAC analysées dans les différents cas d'études (S1-RC2, S2-RC, S3-RC, S3-Cref, S5-R, S5-Cref, S6-R, S7-R, S8-R et S8-Cref). Des hypothèses communes ont été définies pour le dimensionnement de ces puits :

- Chaleur extractible : 100 kW par jeu (alimentation et réinjection) de forage (puissance moyenne sur base de forages sur les alluvions de la Loire et hors alluvions : rapport BRGM/RP56333-FR Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole de mars 2009) ;
- Profondeur de forage 60 m pour la prise d'eau et 30 m pour le rejet ;
- Ecartement entre la prise et le rejet : 20 m ;
- Ecartement entre les deux forages : 10 m ;
- Emprise par kW : 2 m²/ kW installé ;
- Forage constitué d'un tube DN 200.

3.2.3 Fonctions et unités fonctionnelles

3.2.3.1 Fonctions des systèmes comparés (systèmes étudiés et systèmes de référence)

Fonctions principales

Les systèmes comparés dans cette étude permettent d'assurer le chauffage et / ou le refroidissement des charges auxquels ils sont connectés. Pour les cas d'étude de réseaux urbains (cas d'étude 1 à 4 et cas d'étude 11), les charges sont les différents bâtiments alimentés par le réseau. Pour les cas d'étude industriels (cas d'étude 5 à 10), les charges sont des procédés industriels.

La chaleur produite par le système est transmise aux charges à l'aide d'un fluide caloporteur. Pour l'ensemble des cas d'étude considérés, c'est de l'eau qui est utilisée. Cette eau est chauffée à une température différente en fonction de ce qui est alimenté par le système.

Dans le cas des cas d'étude de chauffage / refroidissement urbain, pour pouvoir comparer les systèmes centralisés aux systèmes décentralisés, l'énergie à transmettre est définie au niveau des postes de livraison au client.

Ce service doit être fourni avec un niveau de fiabilité donné. La disponibilité des systèmes comparés dans un même cas d'étude doit donc être similaire.

Fonctions secondaires

Les fonctions secondaires sont des fonctions qui peuvent également être assurées par les systèmes comparés dans cette étude, mais qui ne font pas l'objet d'une comparaison. Parmi les fonctions secondaires, on peut citer :

- La réactivité des équipements à un changement de consigne ;
- La facilité de maintenance ;
- L'emprise au sol nécessaire à l'installation du système[7] ;
- L'intégration du système dans son environnement visuel ;
- L'intégration du système dans son environnement olfactif.

Au sein d'un même cas d'étude, les systèmes comparés pourront avoir des performances différentes en ce qui concerne ces fonctions secondaires.

[7] L'utilisation des terres par les systèmes sera pris en compte dans la comparaison, à travers l'indicateur utilisation des terres. Cependant, deux systèmes pourront être comparés même s'ils nécessitent une emprise au sol différente.

3.2.3.2 *Approche commune pour la définition des unités fonctionnelles et des flux de référence*

Unité fonctionnelle

Il est possible que tous les systèmes comparés dans un même cas d'étude n'aient pas la même durée de vie : c'est par exemple le cas pour les groupes froids à compression et les groupes froid à absorption. L'unité fonctionnelle doit donc intégrer une durée de référence pendant laquelle le système assure sa fonction : une durée de référence d'une année a été choisie. Les impacts liés à la production et à la fin de vie du système sont alors divisés par sa durée de vie en année, ce qui permet de comparer deux systèmes avec des durées de vie différentes.

Pour chaque cas d'étude, l'unité fonctionnelle est définie en suivant les recommandations du référentiel ILCD. Elle prend la forme suivante :

- Fonction : Couvrir les besoins de chauffage et / ou le refroidissement ;
- Dans quelle quantité : demandés par la charge dans des conditions de fonctionnement données (puissance P spécifique à chaque cas d'étude) ;
- Pour quelle durée : pendant une année ;
- Avec quelle qualité : sous la forme d'une eau chauffée à X°C, avec une disponibilité minimum de Y % sur l'année.

Les variables P, X et Y représentent des valeurs qui sont spécifiques à chaque cas d'étude.

Flux de référence

Le flux de référence correspond à une grandeur quantifiée qui permet de fournir une unité fonctionnelle. Le flux de référence est spécifique à chaque cas d'étude, et il est composé de deux éléments :

- Une quantité d'énergie de chauffage, exprimée en kilowattheure (noté kWh_{th}), qui correspond aux besoins de chauffage des charges du système pendant un an.
- Une quantité d'énergie de refroidissement, exprimée en kilowattheure (noté kWh_f), qui correspond aux besoins de refroidissement des charges du système pendant un an.

3.2.4 Frontières du système

Le programme PEP ecopassport ® a développé un PCR concernant les « Profils Environnementaux des Produits Electriques, Electroniques et du Génie Climatique » [8], qui couvre notamment les systèmes de production de chaleur et de froid à usage domestique. Ce PCR est conforme à la norme ISO 14025. Cette étude ne vise pas à être conforme à ce PCR. Cependant, lorsque c'est pertinent, les hypothèses proposées par le PCR ont été retenues pour la définition du champ de l'étude.

3.2.4.1 *Eléments inclus dans les frontières du système*

Chaque système étudié comprend :

- Une (ou plusieurs) unité(s) de production de chaleur et / ou de froid principale(s) :
- Un système secondaire, servant d'appoint et / ou de secours, conformément aux usages :
    - Les systèmes solaires thermiques (centralisés ou décentralisés) ont un appoint pour couvrir les périodes défavorables (période nocturne et saison hivernale), qui peut également servir de secours.
    - Les systèmes centralisés (sur réseau urbain) à base de pompe à chaleur sont complétés par un système secondaire, qui est utilisé pour faire l'appoint et qui sert aussi de secours dans le cas où le système principal serait indisponible.
    - Les systèmes conventionnels centralisés (chaudières et groupes froid) ne nécessitent pas d'appoint, mais ont un secours de 30 % minimum.
    - Les systèmes décentralisés (à l'exception des systèmes solaire thermiques) n'ont pas d'appoint ni de secours.
- Les systèmes de contrôle-commande ;
- Pour les systèmes qui le nécessitent, les équipements permettant de récupérer / dissiper de la chaleur dans une source primaire :
    - Sondes géothermiques

- Prélèvement d'eau de nappe, d'eau de rivière ou d'eau de mer

Pour les cas d'étude de réseau urbain (cas d'étude 1 à 4), les éléments suivants sont également inclus :

- Un réseau de distribution primaire
- Des sous-stations d'échanges pour chaque bâtiment raccordé

3.2.4.2 *Etapes du cycle de vie*

La Figure 3-18 présente les étapes du cycle de vie des systèmes qui sont modélisées dans cette étude.

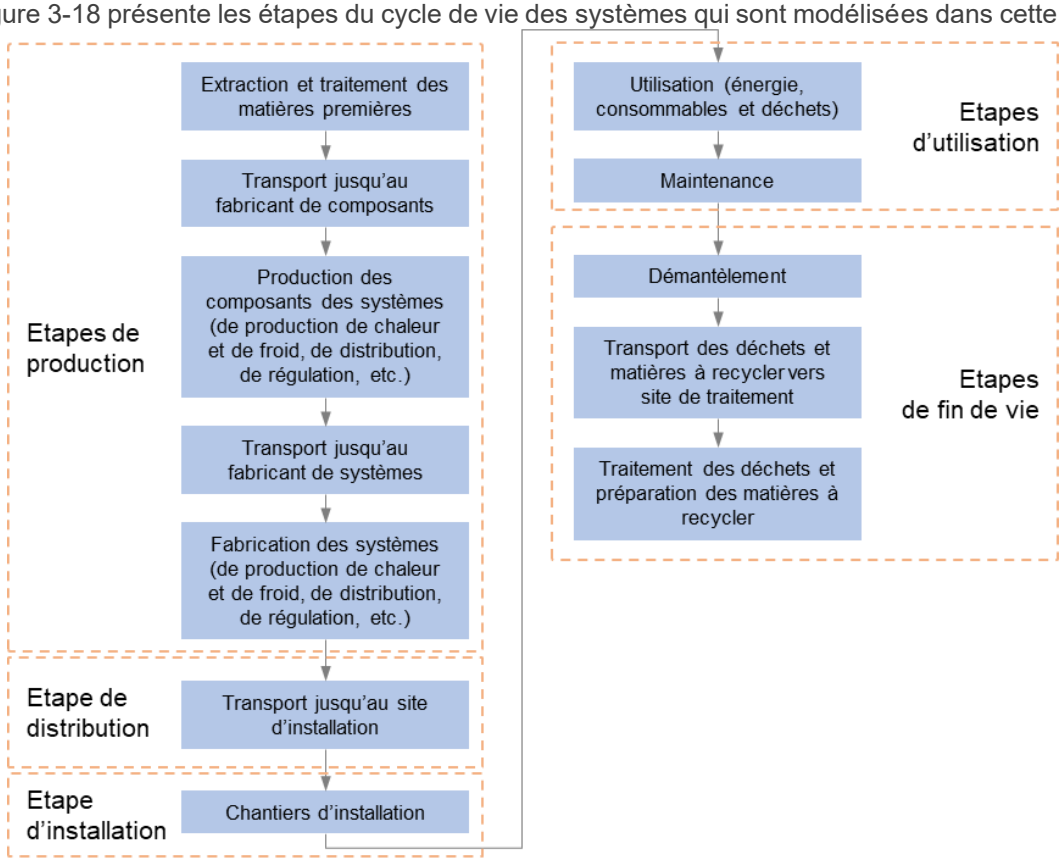


Figure 3-18 : Diagramme général des frontières du système

L'étude couvre l'ensemble des étapes du cycle de vie de ces systèmes :

- L'étape de fabrication :
  - L'extraction et le traitement des matières premières
  - Le transport de ces matières jusqu'au fabricant de composants
  - La production des composants des systèmes
  - Le transport des composants jusqu'au fabricants de systèmes
  - La fabrication des systèmes
- L'étape de distribution comprend :
  - Le transport des systèmes jusqu'au site d'installation
- L'étape d'installation comprend :
  - Le chantier d'installation : le traitement des déchets générés lors de l'installation (emballage notamment), mais aussi (pour les cas d'étude de réseau urbain) les travaux de construction des bâtiments de la chaufferie et des réseaux.
- L'étape d'exploitation :
  - L'utilisation des systèmes : l'énergie nécessaire à la production de chaleur et de froid, les éventuels consommables et les éventuels déchets produits lors de l'exploitation.
  - La maintenance : la production des pièces de rechange, le traitement des pièces en fin de vie et le remplacement du fluide frigorigène pour les systèmes à base de PAC.
- L'étape de fin de vie :
  - Le démantèlement des installations : pour les cas d'étude de réseau urbain, il est considéré que les tubes d'aciers qui composent le réseau de chaleur ou de froid sont

laissés dans le sol même après la fin de l'exploitation du réseau. Les matériaux ne sont donc pas recyclés.
    - La collecte des déchets, et leur transport vers des sites de tri et/ou de traitement appropriés.
    - Le traitement des déchets par un centre de traitement adapté et la préparation des matières collectées en vue de leur recyclage.

Modélisation de la consommation de chaleur de récupération

Les machines à absorption sont généralement alimentées en chaleur de récupération (chaleur dite « fatale » issue des UIOM, de procédés industriels, ou des eaux usées).

Actuellement, très peu de machines à absorption sont déployées sur des réseaux de chaleur urbain. On dispose donc de peu de retour d'expérience sur leur fonctionnement dans ce contexte. La chaleur fatale n'est pas nécessairement disponible en continu ou au moment où on en a besoin sur le réseau. De plus, certaines installations industrielles ont des périodes de fermeture annuelles pendant lesquelles aucune chaleur n'est disponible. Cependant, pour des raisons de rentabilité, on peut supposer que le système de récupération est dimensionné pour couvrir 100% du besoin de chaleur du système. Dans le cadre de cette étude, la chaleur fatale est considérée comme tout le temps disponible.

Plusieurs approches de modélisation peuvent être considérée en ce qui concerne cette consommation de chaleur :

- Soit cette chaleur est considérée comme perdue si elle n'est pas récupérée, et aucune charge environnementale n'est associée à la consommation de chaleur fatale ;

- Soit la chaleur est considérée comme un co-produit de l'activité qui la génère : par exemple, une UIOM a deux fonctions, le traitement des déchets et la production de chaleur. Dans ce cas, il est nécessaire d'allouer les charges environnementales de l'activité entre ces deux activités, par exemple sur la base du revenu généré par les deux « co-produits ».

Dans le cadre de cette étude, la chaleur de récupération sera modélisée sans charge environnementale associée. Une analyse de sensibilité sera réalisée sur les cas d'étude qui en utilisent, pour vérifier la robustesse des conclusions obtenues.

Dans tous les cas, les installations permettant l'approvisionnement de cette chaleur jusqu'à la machine à absorption, incluant les systèmes de traitement éventuels, sont pris en compte dans les frontières du système.

3.2.4.3 Exclusions

Exclusions communes à tous les cas d'étude

Les flux suivants sont exclus de l'analyse, conformément aux recommandations du PCR du Programme PEP ecopassport ® [8] :

- L'éclairage, le chauffage, les sanitaires et le nettoyage des infrastructures (unités de production, plateformes logistiques, sites de transformation, bâtiments administratifs, etc.) ;
- Le transport des employés ;
- La fabrication et la maintenance des installations et des machines de production (pour les étapes de production uniquement) ;
- La construction et la maintenance des bâtiments (pour les étapes de production uniquement) ;
- Les systèmes et les infrastructures de transport ;
- Les flux des services administratifs, de gestion et de R&D ;
- Les activités de marketing liées au produit ;
- Les installations de restauration destinées au personnel ;

Exclusions spécifiques aux cas d'étude de réseau urbain (cas d'étude 1 à 4)

Les réseaux de distribution secondaires, qui distribuent la chaleur au sein de chaque immeuble jusqu'aux logements, ne sont pas pris en compte dans les frontières du système. Quel que soit le système considéré, ces réseaux sont identiques, ils sont donc exclus de la comparaison.

De manière générale, la conception des bâtiments alimentés par les réseaux est considérée similaire que le système de chauffage soit centralisé ou décentralisé :

- Pour un système centralisé avec réseau urbain, un local pour la sous-station doit être construit dans chaque bâtiment ;
- Pour un système décentralisé, un local chaufferie et / ou climatisation doit être réalisé.

Nous avons considéré que les différences de conception entre les bâtiments accueillant ces deux types de systèmes ne sont pas suffisamment significatives pour être prises en compte dans le cadre de cette étude. Les impacts liés à la construction des bâtiments à chauffer et/ou refroidir ne sont donc pas pris en compte.

Le choix d'un système de production de chaleur et/ou de froid centralisé ou décentralisé a une influence sur le dimensionnement des réseaux à construire au niveau du quartier :

- Dans le cas des systèmes décentralisés, les bâtiments sont aussi alimentés en électricité basse tension, avec éventuellement des tableaux électriques dédiés dans les locaux de chaufferie, des compensateurs de puissance réactive. Dans le cas où des chaudières gaz sont utilisées, un réseau gaz basse pression doit aussi être construit pour alimenter individuellement chaque bâtiment.
- Dans le cas des systèmes centralisés, les systèmes de production sont alimentés en moyenne tension, avec des transformateurs dédiés et des compensateurs de puissance réactive. Les bâtiments individuels restent alimentés en électricité basse tension, mais il est possible que des transformateurs de quartier de puissance moins élevée soient installés. Un réseau urbain de chaleur ou de froid transporte de l'eau entre la centrale de production et les bâtiments. En ce qui concerne le réseau de gaz basse pression, nous n'avons pas trouvé de statistiques permettant de dire si les bâtiments alimentés par un réseau de chaleur soient aussi alimentés en gaz pour les usages cuisson uniquement.

Les hypothèses suivantes ont été prises concernant les réseaux :

- Pour les systèmes décentralisés, les consommations d'électricité ont été modélisées avec des données adaptées d'ecoinvent (voir § 4.1.2.2), représentatives des consommations d'électricité basse tension, et qui prennent en compte l'infrastructure nécessaire (transformateurs, réseaux). Les consommations de gaz ont été modélisées avec des données ecoinvent représentatives des consommations basse pression, qui prennent également en compte la construction des réseaux basse pression. Nous n'avons cependant pas fait d'hypothèses spécifiques aux différents cas d'étude en ce qui concerne la longueur de ces réseaux, ni la puissance des transformateurs nécessaires.
- Pour les systèmes centralisés, les consommations d'électricité ont été modélisées avec des données adaptées d'ecoinvent, représentatives des consommations d'électricité moyenne tension. Des hypothèses spécifiques aux cas d'étude ont été faites sur les transformateurs à inclure dans les installations centralisées. Les réseaux de chaleur et/ou de froid ont aussi été modélisés à partir d'hypothèses spécifiques à l'étude (longueur, matériaux, etc.).

Enfin, pour la plupart des systèmes centralisés, un système secondaire est ajouté pour servir d'appoint et/ou de secours (chaudière gaz pour la production de chaleur, groupe froid pour la production de froid). Comme ces systèmes sont moins sollicités que les systèmes principaux, il est possible qu'ils subissent moins d'usure, et donc que leur durée de vie soit plus importante. Cependant, pour les chaudières en particulier, comme les normes d'émissions évoluent régulièrement, il est aussi possible qu'ils aient une durée de vie similaire malgré cette usure moindre. Par manque de données réelles sur la durée de vie de ces systèmes, nous avons considéré que la durée de vie d'un équipement était indépendante du fait qu'il soit utilisé comme système principal ou système secondaire.

Exclusions spécifiques aux cas d'étude industriels

Le réseau de distribution interne à l'installation industrielle, pour acheminer le fluide caloporteur depuis l'unité de production jusqu'au procédé industriel, est exclu des frontières du système. Il est supposé qu'il soit identique quel que soit le système de production utilisé.

3.2.5 Critère de coupure

La norme ISO 14044 prévoit la définition d'un critère de coupure afin d'exclure certains flux qui ne contribuent pas de façon significative au résultat. Le critère de coupure peut concerner la masse, l'énergie ou le niveau d'importance de l'impact environnemental.

Un critère de coupure de 1 % en masse est appliqué pour cette étude. Tous les flux élémentaires qui représentent moins de 1 % de la masse totale des systèmes mis en œuvre pour produire et distribuer de la chaleur et / ou du froid peuvent être exclus des frontières du système si les données ne sont pas disponibles. Ce critère ne signifie pas pour autant que toute matière représentant moins de 1 % de la masse totale est exclue. En particulier, les fluides frigorigènes, dont le potentiel de réchauffement global peut être très élevé, sont bien pris en compte dans le périmètre de l'étude.

3.2.6 Principe de modélisation

Certaines activités permettent la production de plusieurs produits ou assurent plusieurs services. Or, dans une analyse du cycle de vie, on ne s'intéresse généralement qu'à un seul de ces produits. Il est alors nécessaire de répartir les charges environnementales et l'utilisation des matières premières entre le produit d'intérêt et les autres co-produits. On parle alors d'affectation ou d'allocation. Par exemple, une aciérie produit de l'acier, mais également des cendres utilisées pour faire du ciment, et parfois de l'électricité. Si on veut évaluer les impacts environnementaux de la production d'acier, on doit déterminer comment affecter les impacts de l'aciérie entre les différents co-produits qu'elle génère.

La norme ISO 14044 recommande d'éviter autant que possible l'allocation en divisant un procédé unitaire en différents sous-procédés. Le référentiel ILCD préconise d'adapter l'approche de modélisation en fonction de la situation décisionnelle de l'étude. Pour la Situation A (cas de la présente étude), il est préconisé de modéliser les activités multifonctionnelles en utilisant l'expansion du système plutôt que l'allocation, et en considérant que le produit substitué est un produit moyen sur le marché (voir § 6.5.4.2 du référentiel ILCD). A ce jour, aucune base de données d'analyse du cycle de vie ne propose de données qui soient conformes à ces préconisations.

Plusieurs études relevant de la Situation A ont adopté une approche qui consiste à utiliser des données issues de la base de données ecoinvent en version APOS (Allocation at the Point of Substitution), notamment pour modéliser les intrants secondaires, et à faire de la substitution pour les sortants à recycler. Après divers échanges avec le réviseur, il a été jugé que cette pratique n'est pas cohérente, alors que la norme ISO 14044 préconise la cohérence de la modélisation d'un même flux sur l'ensemble du cycle de vie (§ 4.3.4.2). De plus, il a été établi que l'on pouvait douter de la conformité des préconisations ILCD en Situation A à l'ISO 14040-44 (ref : communication avec Dieuwertje Schrijvers, PhD - Postdoctoral researcher, The Life Cycle Group CyVi - University of Bordeaux - ISM).

Dans le cadre de cette étude, les données issues de la base ecoinvent 3.5 [9] en version cut-off ont été utilisées. La fin de vie des scenarios a été modélisée selon les exigences du Guide Product Environmental Footprint (PEF) Category rules V6.3 [10]. La méthodologie adoptée est la "circular footprint formula" qui permet d'allouer impacts et crédits à la fois à l'amont du cycle de vie (contenu en recyclé) et à l'aval (valorisation en recyclage ou valorisation énergétique), en allouant ces dits impacts et crédits selon des facteurs de marché afin d'éviter tout double-comptage.

Cette formule est donc appliquée à tous les matériaux et intègre pour tous ces matériaux des paramètres qui lui sont propres : taux de recyclé, taux de recyclage, taux de valorisation énergétique etc. Ces valeurs sont données à l'annexe C du guide [10].

Emissions dues à la production	$(\mathbf{1} - \boldsymbol{R_1}) * \boldsymbol{E_v} + \boldsymbol{R_1} * \boldsymbol{E_{recycled}}$
Emissions et crédits dus à l'utilisation de matière secondaire	$-(1 - A) * R_1 * (E_{recycled} - E_v * \frac{Q_{Sin}}{Q_p})$
Emissions et crédits dus au recyclage en fin de vie	$(1 - A) * R_2 * (E_{recyclingEoL} - E_{*v} * \frac{Q_{Sout}}{Q_p})$
Emissions et crédits dus à la valorisation énergétique	$(1 - B) * R_3 * (E_{ER} - E_{SE,Heat} * LHV * X_{ER,Heat} - E_{SE,Elec} * LHV * X_{ER,Elec})$
Emissions dus à la fin de vie sans valorisation (enfouissement)	$(1 - R_2 - R_3) * E_D$

Avec :

- *A : Coefficient d'allocation matière entre recyclé et recyclage*
- *B : Coefficient d'allocation énergétique*
- *R1 : Taux de recyclé*
- *R2 : Taux de recyclage*
- *R3 : Taux de valorisation énergétique*
- *Qsin/Qp : Perte de qualité concernant le matériau recyclé (en entrée)*
- *Qsout/Qp : Perte de qualité concernant le matériau recycle (en sortie)*
- *LHV : Pouvoir Calorifique Inférieur*
- *Xer.heat : Efficacité énergétique du procédé de valorisation (chaleur)*
- *Xer.elec : Efficacité énergétique du procédé de valorisation (électricité)*
- *Ev : Emissions de la production de matériau primaire*
- *Erecycled : Emissions de la production de matériau secondaire*
- *ErecyclingEOL : Emissions du procédé de recyclage*
- *Ev* : Crédits recyclage*
- *Eer : Emissions du procédé de valorisation énergétique*
- *Ese.heat : Crédits chaleur*
- *Ese.elec : Crédits électricité*
- *Ep : Emissions de l'enfouissement*

Pour chaque matériau, la formule identifie et alloue les différents flux :

- Les bénéfices dus à l'utilisation de matériau recyclé
- Les impacts dus à la production de matériau primaire
- Les impacts et crédits dus au recyclage
- Les impacts et crédits dus à la valorisation énergétique
- Les impacts de l'enfouissement

3.2.7 Exigence de qualité des données

Les exigences en ce qui concerne la qualité des données à utiliser dans cette étude sont les suivantes :

- Représentativité temporelle : les données à utiliser doivent être valables pour la période 2019-2025.
- Représentativité géographique : les données utilisées doivent être valables pour des systèmes disponibles sur le marché français.
- Représentativité technologique : les données utilisées doivent être représentatives de chaque technologie étudiée, et elles doivent correspondre à la manière dont elles sont exploitées dans chaque cas d'étude.
- Complétude : l'étude doit respecter les frontières définies au § 3.2.4 et le critère de coupure défini au § 3.2.5.
- Précision : le niveau de précision des données doit être cohérent avec l'objectif défini d'aide à la décision. Les données relatives à la fabrication des systèmes et les données nécessaires à

l'évaluation de la consommation énergétique des systèmes seront collectées et / ou validés par les constructeurs des équipements ou leurs exploitants.

Afin d'évaluer la robustesse de l'étude, la qualité des données a été analysée qualitativement selon des seuils de qualité définis.

La qualité des données a été mesurée sur deux types de données afin de rendre compte de la qualité générale de l'inventaire [11] :

- Les données d'inventaire de second rang qui correspondent aux données de modélisation issus de la base de données ecoinvent v3.5. Elles seront désignées par l'appellation « données de d'arrière-plan ».
- Les données d'inventaire de premier rang qui correspondent aux quantifications d'appel des données d'inventaire de second rang (hypothèses de modélisation). Elles seront désignées par l'appellation « données de premier plan ».

Afin de couvrir les différents aspects qui définissent la qualité des données, des seuils de qualité ont été définis sur les critères suivants :

- La précision des données
- La représentativité temporelle
- La représentativité géographique
- La représentativité technologique

Une analyse globale de la complétude par scénario est menée en parallèle.

Concernant la précision des données, les critères définissant les seuils de qualités sont les suivants :

Précision	
	Donnée transmise par un fournisseur et spécifique à un système considéré
	Donnée non spécifique au système étudié, estimée à partir de bibliographie sur un produit équivalent / proche et soumise à validation auprès de fournisseurs
	Donnée non spécifique au système étudié, estimée à partir de bibliographie sur un produit équivalent / proche non soumise à validation auprès de fournisseurs
	Donnée estimée à partir d'hypothèses fortes

Dans cette étude, peu de données ont réellement été collectées auprès de fournisseurs concernant les compositions matières des équipements par exemple. Ces données ont donc été déduites de littérature technique et/ou de retour d'expérience d'experts Tractebel.

Concernant la représentativité temporelle, elle est évaluée selon les mêmes exigences entre les données de premier plan et les données d'inventaire, telles que représentées ci-dessous :

Représentativité temporelle		
Légende	Données de premier plan	Données d'arrière-plan
	2015 à 2020	2015 à 2020
	2000 à 2015	2005 à 2015
	<2000	<2005

Concernant la représentativité géographique, elle est évaluée selon les mêmes exigences [11] entre les données de premier plan et les données d'arrière-plan, telles que représentées ci-dessous :

Représentativité géographique	
	Donnée appropriée à la région considérée (France)

	Donnée représentative d'une région plus large, dans laquelle est incluse la région considérée (Europe)
	Représentativité géographique inadéquate ou inconnue (Monde)

Concernant la représentativité technologique, elle est évaluée selon les mêmes exigences [11] entre les données de premier plan et les données d'arrière-plan, telles que représentées ci-dessous :

Représentativité technologique	
	Donnée appropriée au procédé analysé
	Donnée relative au même procédé ou matériau, mais se référant à une technologie différente
	Approximation technologique

3.2.8 Méthodes de caractérisation d'impact

Deux types d'indicateurs sont utilisés dans cette étude :

- Des indicateurs d'impacts environnementaux orientés problèmes, dits « midpoint » : ces indicateurs sont utilisés pour évaluer la contribution du système étudié à une problématique environnementale donnée, comme le changement climatique, ou l'épuisement des ressources minérales et métalliques.
- Des indicateurs d'impacts environnementaux orientés dommages, dit « endpoint » : ces indicateurs permettent d'évaluer les dommages causés par le système étudié sur trois domaines de protection : la santé humaine, les écosystèmes et la disponibilité des ressources naturelles.

Une description succincte de chaque catégorie d'impact est présente dans le glossaire.

3.2.8.1 Indicateurs environnementaux midpoint

La sélection des catégories d'impact à considérer et des méthodes de caractérisation associées a été réalisée en suivant les recommandations du rapport développé dans le cadre de l'initiative Environmental Footprint (PEF/OEF) de la Commission Européenne en 2017 [12]. Les versions utilisées sont celles disponibles dans le logiciel de modélisation ACV utilisé pour cette étude, à savoir SimaPro 9.0 [13] : méthode « EF method (adapted) » en version 1.0 dans SimaPro, basées sur la méthode Environmental Footprint 2.0.

Les recommandations de méthodes de caractérisation sont associées à des niveaux qui traduisent la maturité des modèles :

- le niveau I correspond aux modèles jugés robustes et matures ;
- le niveau II correspond aux modèles qui sont jugés satisfaisants mais qui doivent être améliorés pour représenter plus fidèlement les mécanismes environnementaux ;
- le niveau III correspond aux modèles qui ne sont pas pleinement satisfaisants mais qui correspondent à l'état de l'art actuel de la connaissance des mécanismes environnementaux ;

Tableau 3-6 : Indicateurs d'impacts environnementaux midpoint sélectionnés

Catégorie d'impact	Reco. par	Modèle	Niveau de reco.
Changement climatique	EF 2017	Climate change; midpoint; GWP 100; IPCC2013; (kg CO_2 eq.)	I
Destruction de la couche d'ozone	EF 2017	Ozone depletion; midpoint; ODP; WMO2014; (kg CFC-11 eq.)	I
Toxicité humaine, cancer	EF 2017	Cancer human health effects; midpoint; CTU_h; USEtox; (CTUh)	III

Catégorie d'impact	Reco. par	Modèle	Niveau de reco.
Toxicité humaine, autre que cancer	EF 2017	Non-cancer human health effects; midpoint; CTU_h; USEtox; (CTUh)	III
Particules fines	EF 2017	Respiratory inorganics; midpoint; PM2.5 eq; UNEP, Fantke et al. 2016; (disease inc.)	I
Radiation ionisante, santé humaine	EF 2017	Ionizing radiation; midpoint - human health; ionising radiation potential; Frischknecht et al. (2000); (kg U235 eq.)	II
Formation photochimique d'ozone, santé humaine	EF 2017	Photochemical ozone formation; midpoint - human health; POCP; Van Zelm et al. (2008); (kg NMVOC eq.)	II
Acidification terrestre et eau douce	EF 2017	Acidification; midpoint; Accumulated Exceedance; Seppala et al 2006, Posch et al (2008); (mol H^+ eq.)	II
Eutrophisation, terrestre	EF 2017	Eutrophication terrestrial; midpoint; Accumulated Exceedance; Seppala et al. 2006, Posch et al 2008 ; (mol N eq.)	II
Eutrophisation, marine	EF 2017	Eutrophication marine; midpoint; EUTREND model (Struijs et al, 2009) ; ReCiPe2008; (kg N eq.)	II
Eutrophisation, eau douce	EF 2017	Eutrophication freshwater; midpoint; EUTREND model (Struijs et al, 2009) ; ReCiPe 2008; (kg P eq.)	II
Ecotoxicité, eau douce	EF 2017	Ecotoxicity freshwater; midpoint; CTUe; USEtox; (CTU_e)	III
Utilisation des terres	EF 2017	Land use; midpoint; soil quality index; LANCA, Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016 ; (Quality score)	III
Consommation d'eau	EF 2017	Resource depletion - water; midpoint; freshwater scarcity; Available Water Remaining (AWARE) in UNEP (2016); (m^3 water eq.)	III
Ressources minérales et métalliques	EF 2017	Resource use mineral and metals; midpoint; ADP ultimate reserve; Van Oers et al 2002; (kg Sb eq.)	III
Ressources énergétiques fossiles	EF 2017	Resource use energy carriers; midpoint; ADP fossil fuels; Van Oers et al 2002 ; (MJ)	III

3.2.8.2 Indicateurs environnementaux endpoint

Un ensemble de modèles de caractérisation orientés dommages (dits « endpoint »), issus de la méthode ReCiPe 2016 v1.1 (hiérarchiste) est également utilisé dans cette étude. Ces indicateurs permettent d'évaluer les dommages causés par les systèmes aux trois domaines de protection considérés en ACV : la santé humaine, les écosystèmes, et les ressources naturelles.

Tableau 3-7 : Indicateurs d'impacts environnementaux endpoint sélectionnés

Catégorie d'impact	Indicateur(s) endpoint
Changement climatique	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY) ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Terrestrial ecosystems (species.yr) ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Freshwater ecosystems (species.yr)
Destruction de la couche d'ozone	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY)
Radiation ionisante	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY)
Formation photochimique d'ozone	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY) ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Terrestrial ecosystems (species.yr)
Particules fines	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY)
Acidification terrestre	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)
Eutrophisation, eau douce	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)

Catégorie d'impact	Indicateur(s) endpoint
Ecotoxicité, sol	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)
Ecotoxicité, eau douce	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)
Ecotoxicité, marine	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)
Toxicité humaine, cancer	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY)
Toxicité humaine, autre que cancer	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY)
Occupation de sols	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Ecosystems (species.yr)
Consommation d'eau	ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Human Health (DALY) ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Terrestrial ecosystems (species.yr) ReCiPe 2016 Endpoint – Hierarchist – Freshwater ecosystems (species.yr)

3.2.8.3 Correspondance entre les indicateurs utilisés aux niveaux midpoint et endpoint

Les deux jeux d'indicateurs ont été utilisés en conjonction :

- Les indicateurs endpoint sont utilisés pour identifier les catégories d'impacts pertinentes (voir § 5.1.1.2)
- Les indicateurs midpoint sont utilisés pour calculer les résultats de l'étude.

Cette approche est valide dans le cas où on utilise un ensemble cohérent d'indicateurs au niveaux midpoint et endpoint. Or, dans cette étude, la méthode Environmental Footprint a été choisie pour évaluer les impacts au niveau midpoint. Nous devons donc vérifier que cette approche reste valable avec deux jeux d'indicateurs différents.

Le tableau suivant présente les correspondances entre les catégories d'impacts des deux méthodes sélectionnées.

Tableau 3-8 : Correspondance entre les indicateurs utilisés au niveau midpoint et endpoint

EF 2017	ReCiPe 2016 endpoint H
Changement climatique	Changement climatique, santé humaine Changement climatique, écosystèmes terrestres Changement climatique, écosystèmes d'eau douce
Destruction de la couche d'ozone	Destruction de la couche d'ozone
Radiation ionisante, santé humaine	Radiation ionisante
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	Formation d'ozone, santé humaine Formation d'ozone, écosystèmes terrestres
Particules fines	Particules fines
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	Toxicité humaine, non-cancérogène
Toxicité humaine, effets cancérogènes	Toxicité humaine, cancérogène
Acidification terrestre et eau douce	Acidification terrestre
Eutrophisation, eau douce	Eutrophisation, eau douce
Eutrophisation, marine	Eutrophisation, marine
Eutrophisation, terrestre	*Pas d'équivalence*
Ecotoxicité, eau douce	Écotoxicité, eau douce
Pas d'équivalence	Écotoxicité, terrestre Écotoxicité, marine
Usage des sols	Usage des sols
Consommation d'eau	Consommation d'eau, écosystèmes terrestres Consommation d'eau, écosystèmes aquatiques
Ressources énergétiques	Épuisement des ressources fossiles
Ressources minérales et métalliques	Épuisement des ressources minérales et métalliques

On observe que les deux méthodes sont proches, mais qu'il n'y a pas de correspondance exacte entre les modèles utilisés au niveaux midpoint et endpoint :

- Pour l'eutrophisation terrestre, il existe un modèle midpoint mais pas de modèle endpoint. Il sera impossible d'identifier la contribution de cette catégorie d'impact aux dommages aux écosystèmes. Cependant, les polluants qui causent l'eutrophisation terrestre (nitrates et ammoniac) sont les mêmes que ceux qui causent l'eutrophisation marine. On peut donc considérer en première approximation que si un système cause peu de dommage aux écosystèmes via l'eutrophisation marine, il en causera également peu via l'eutrophisation terrestre.
- A l'inverse, les indicateurs endpoint « Ecotoxicité terrestre » et « Ecotoxicité, marine » n'ont pas d'équivalent au niveau midpoint. Ces modèles sont présents dans ReCiPe, mais ces catégories d'impacts sont encore mal connues et ces indicateurs sont peu robustes.

Même dans le cas où les deux modèles existent, ils ne sont pas forcément cohérents entre eux : il n'existe pas forcément un facteur de caractérisation au niveau endpoint pour tous les flux qui disposent d'un facteur de caractérisation au niveau midpoint (ou inversement).

- Seules quatre catégories d'impacts ont des modèles totalement cohérents entre les niveaux midpoint et endpoint : changement climatique, rayonnement ionisant, eutrophisation marine et eutrophisation, eau douce. Pour ces catégories, les modèles de caractérisation utilisés dans ReCiPe 2016 midpoint et dans EF 2017 sont exactement les mêmes.
- Dans une moindre mesure, c'est aussi le cas pour les catégories Destruction de la couche d'ozone et Formation photochimique d'ozone, où ReCiPe 2016 s'appuient sur les mêmes modèles que EF 2017, mais dans une version plus récente.

Les deux jeux d'indicateurs ne sont donc pas tout à fait cohérents, mais les différences identifiées ne remettent pas en cause la validité de l'approche utilisée pour identifier les indicateurs les plus pertinents.

3.2.8.4 Autres types d'impacts environnementaux

L'étude se concentre sur des indicateurs couramment utilisés en analyse du cycle de vie. Cependant, les systèmes de production de chaleur et de froid sont susceptibles d'avoir des impacts, notamment locaux, dans d'autres catégories. On peut notamment citer le bruit ou les odeurs, qui sont susceptibles de causer des impacts sanitaires sur les populations vivant proches des installations, ou pour les employés travaillant dans les chaufferies. Les systèmes de dissipation de la chaleur dans l'air sont également susceptibles de contribuer aux phénomènes d'ilots de chaleur en milieu urbain.

Certains systèmes rejettent des effluents à une température élevée. C'est notamment le cas des groupes froids (coté condenseur). Des études montrent que ces effluents peuvent causer des dommages aux écosystèmes dans les milieux d'eau douce. Des travaux de recherche ont même visé à définir un modèle de caractérisation utilisable en ACV pour prendre en compte ces dommages [14]. Ce modèle n'étant pas disponible dans le logiciel SimaPro que nous avons utilisé, il n'a pas été possible d'évaluer ces dommages. De plus, le modèle a été développé pour les Etats-Unis, il nécessiterait des adaptations pour être utilisable dans un contexte français. Ce travail n'a pas pu être réalisé dans le cadre de cette étude.

Plusieurs éléments permettent cependant de penser que ces dommages sont probablement faibles :

- Les systèmes centralisés et industriels sont généralement mis en œuvre dans des installations soumises à la réglementation ICPE. Celle-ci, ainsi que le Code de l'Environnement, encadrent les rejets dans la nature, dont les rejets thermiques. Une étude d'impact est réalisée pour évaluer les impacts de l'installation sur son environnement local.
- Pour la géothermie très basse énergie sur nappe, l'arrêté des prescriptions générales lié au cadre réglementaire de la géothermie de minime importance[8] stipule : « *Pour les échangeurs géothermiques ouverts, l'exploitant d'un échangeur géothermique ouvert prend en considération les ouvrages de prélèvement d'eau voisins, déclarés ou autorisés, et susceptibles d'être influencés par son activité. Il établit une distance minimale afin de ne pas les influencer de façon significative. Son activité ne doit pas causer une variation de température de la nappe d'eau exploitée de plus de 4°C à 200 m des échangeurs géothermiques de production ou de réinjection. La température maximale de réinjection ne doit pas dépasser 32°C* ».

[8] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000030855331&categorieLien=id

- Du fait du principe de fonctionnement des machines à cycle thermodynamique (pompe à chaleur et groupe froid), une différence de température de rejet dans le milieu, trop importante, par rapport à la température de captage nuit à l'efficacité des machines. Le gestionnaire de l'installation a donc tout intérêt à limiter la température de rejet pour améliorer la performance énergétique et économique de son installation. La situation est donc assez différente de l'utilisation d'eau de refroidissement dans une centrale thermique à flamme ou dans une centrale nucléaire.

3.3 Cas d'étude 1

Le cas d'étude 1 consiste à répondre aux besoins de chauffage d'un ensemble de 50 bâtiments. Il est défini de la manière suivante :

- Réseau de chaleur urbain ;
- Puissance chaude au consommateur de 5 MW ;
    - 4 MW de logements dits neufs ;
    - 1 MW de bureaux dits neufs.
- Puissance chaude produite en centralisé de 5,25 MW ;
- Régime de température du réseau secondaire de chaque sous-station (bâtiment) : 50/40°C ;
    - Dans le cas des systèmes décentralisés, nous avons supposé que ce même régime de température était utilisé ;
    - Ce régime d'eau est généralement utilisé pour alimenter des radiateurs basse température. Pour des planchers chauffants, le régime est en général abaissé. Nous n'avons pas étudié ce cas.
- Régime de température du réseau de chaleur 60/50°C ;
    - Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau à 60/50°C sur tout le réseau car la variation de température due aux pertes thermiques du réseau est inférieure à 1°C.
- Raccordement considéré de 50 sous-stations de 100 kW chacune.

Les systèmes comparés sont les suivants (deux variantes de système renouvelable centralisé sont comparées dans ce cas d'étude) :

- Système renouvelable centralisé 1 (S1-RC1) : Réseau de chaleur alimenté par une pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales ;
- Système renouvelable centralisé 2 (S1-RC2) : Réseau de chaleur alimenté par une pompe à chaleur sur aquifère ;
- Système de référence centralisé (S1-Cref) : Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- Système de référence décentralisé 1 (S1-Dref1) : Chaudières gaz par bâtiment ;
- Système de référence décentralisé 2 (S1-Dref2) : Pompe à chaleur aérothermique par bâtiment.

Ce type de système correspond à la construction d'un nouveau quartier en périphérie de la ville avec du logement collectif, des sondes géothermiques ou des forages sur nappe phréatique sous les bâtiments et à proximité et quelques locaux de bureaux.

3.3.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 1 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chauffage de 50 bâtiments (puissance totale souscrite de 5 MW), dans des conditions climatiques moyennes représentatives de la zone H2b, pendant une année, en régime 50/40°C dans le circuit de chauffage secondaire, avec une disponibilité minimum de 95% »

La consommation annuelle en chaleur est de 10,2 GWh.

3.3.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.3.2.1 Description du système renouvelable centralisé S1-RC1

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une pompe à chaleur sur sondes géothermiques (§ 3.2.1.1).

Le système S1-RC1 est ainsi composé de :

- Sondes géothermiques environ 1,1 MW (200 m de profondeur) ;
  - 14 700 m² d'emprise au sol ;
- Pompes à chaleur 1,6 MW ;
  - Avec cette puissance (30% de la puissance totale) la production permet de couvrir 80% de la production de chaleur et a une charge moyenne annuelle de 62% (consommation de la pompe à chaleur / consommation maximale de la pompe à chaleur à 100% de la puissance et 365 jours par an).
- Secours et appoint chaudière gaz 2 * 2.625 MW (dont 3.7 MW d'appoint) ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 4 ballons de 5000L ;
- Longueur du réseau de chaleur : 2200 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
  - 50 stations de 100 kW.

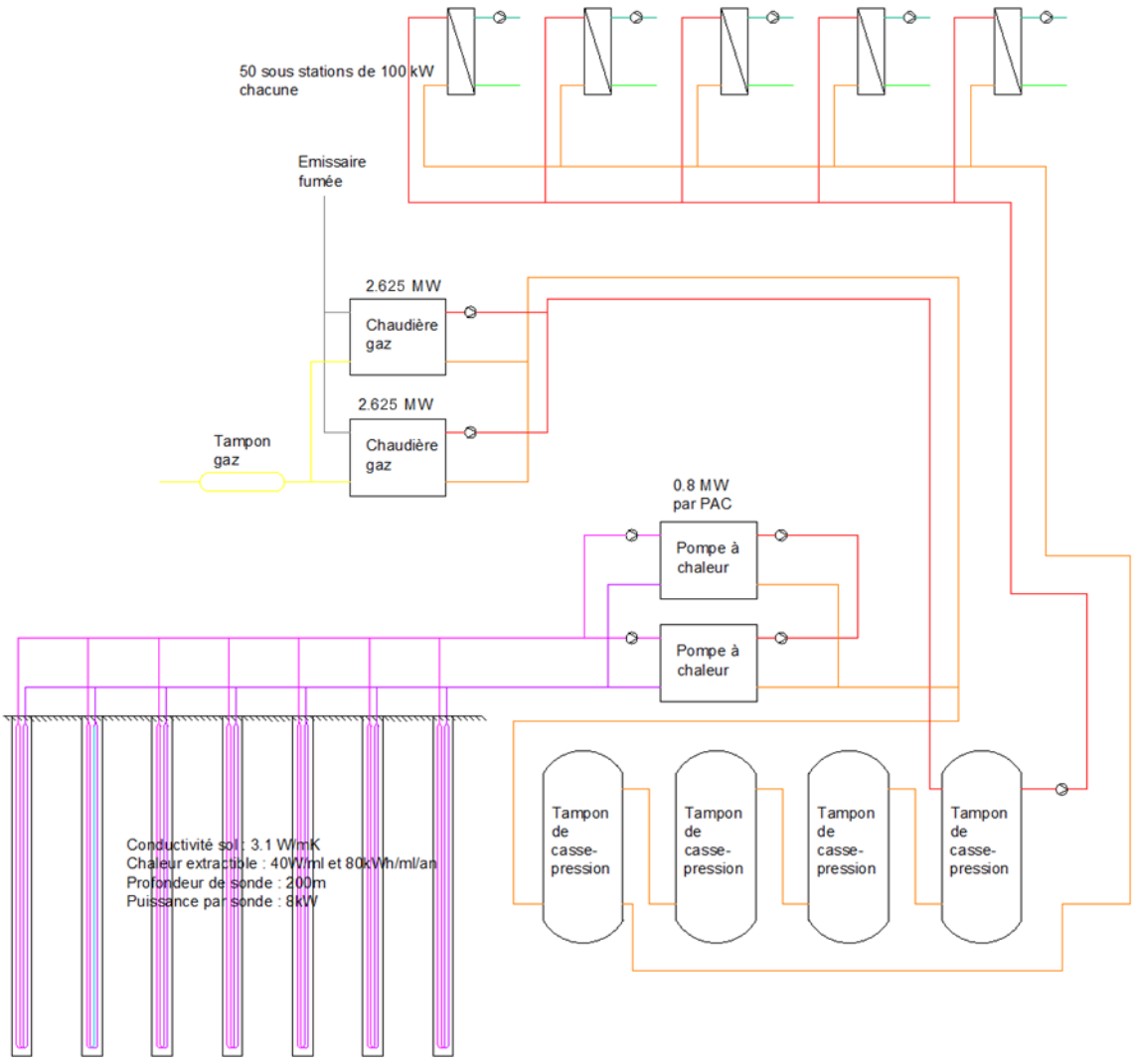


Figure 3-19 : Système S1-RC1 : Schéma descriptif

Le système sur lequel la pompe à chaleur sera raccordée sera un système de champs de capteurs de type sondes double U avec, pour chaque sonde, 2 tubes entrants et 2 tubes sortants sur une profondeur de 200 m. Le choix de cette technologie de tube double U est représentatif du marché actuel.

Le gradient de température est d'environ +3°C par 100 m de profondeur supplémentaire [15]. En dessous de 15 m la température de la surface n'a plus d'impact, la température en dessous est donc indépendante de la saison [16]. La température du sol a été prise à une température de 12°C à 15 m (profondeur à laquelle la variation saisonnière n'impacte peu ou plus la température du sol) de profondeur en cohérence avec la zone géographique choisie.

Le dimensionnement choisi pour ces sondes est le suivant :

- Conductivité du sol de 3,1 W/mK (correspondant à un sol ayant une bonne conductivité thermique afin de permettre la rentabilité d'un projet de géothermie);
- Chaleur extractible : 40 W/ml [17] [18] ;
- Profondeur de sonde de 200 m (longueur habituelle pour des champs de capteurs (limite du cadre de géothermie de minime importance (GMI) afin de n'avoir besoin que d'une déclaration, cependant nous passons la limite des 500kW ici) ;
- Puissance par sonde : 8 kW ;
- Ecartement entre sondes : 10 m ;
- Emprise par kW : 12,5 m²/kW installé ;
- Sonde constituée de 4 tubes DN40 ;
- Forage d'un diamètre de 150 mm.

3.3.2.2 Description du système renouvelable centralisé S1-RC2

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une pompe à chaleur sur aquifère (§ 3.2.1.2).

Le système S1-RC2 est ainsi composé de :

- Forage dans la nappe d'environ 1,3 MW (forage de prélèvement et forage de réinjection) ;
    - Environ 2700 m² d'emprise au sol ;
- Pompes à chaleur 1,7 MW ;
    - Avec cette puissance (32% de la puissance totale) la production permet de couvrir 83% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 60%.
- Secours et appoint chaudière gaz 2 * 2,625 MW (dont 3,6 MW d'appoint) ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 4 ballons de 5000 L ;
- Longueur du réseau de chaleur : 2200 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
    - 50 stations de 100 kW.

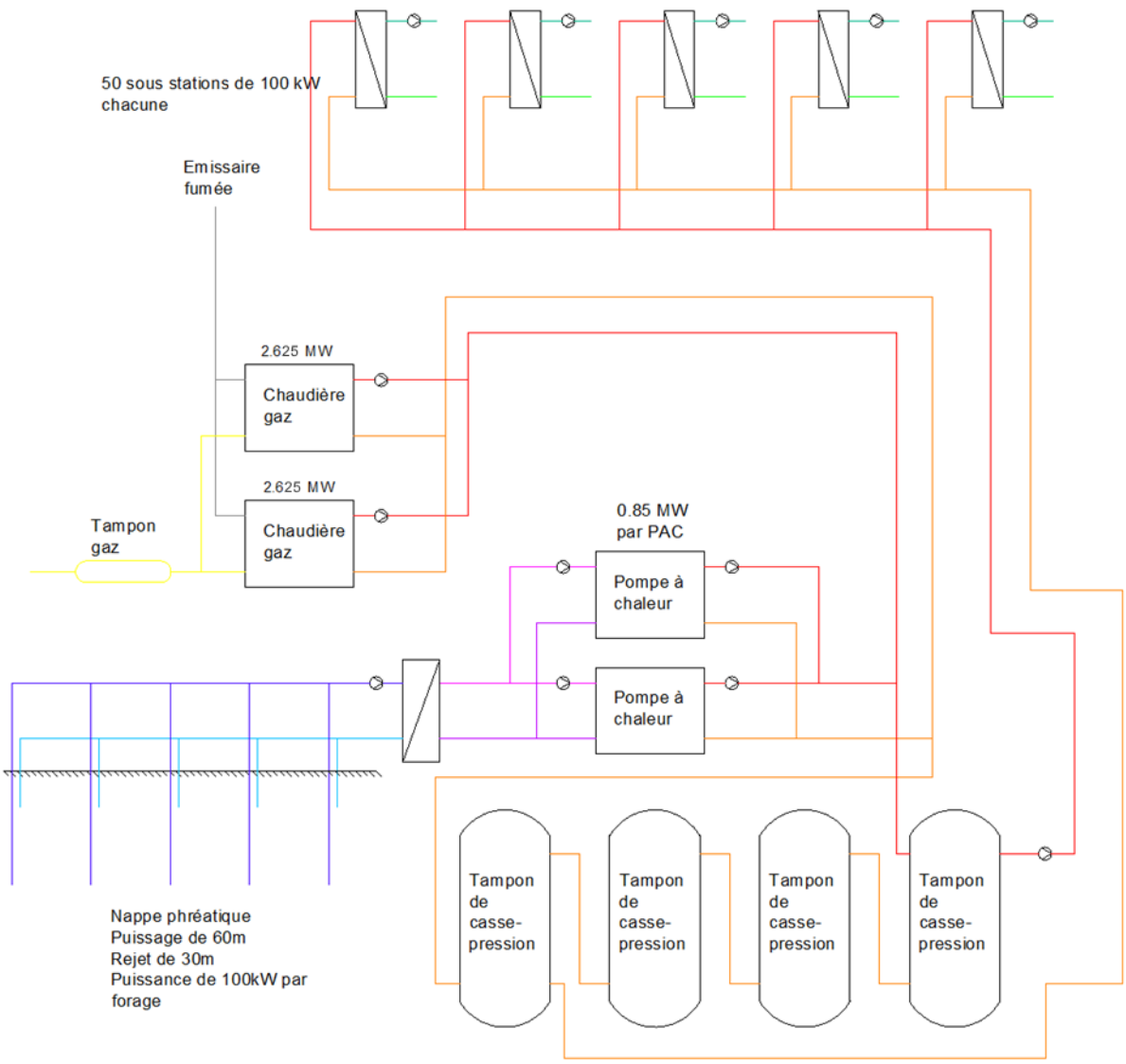


Figure 3-20 : Système S1-RC2 : Schéma descriptif

3.3.2.3 Description du système de référence centralisé S1-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Le système S1-Cref est ainsi composé de :

- 3 chaudières gaz de 1,75 MW chacune ;
  - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 23%.
- Appoint chaudière gaz 1,75 MW ;
- Longueur du réseau de chaleur : 2200 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
  - 50 stations de 100 kW.

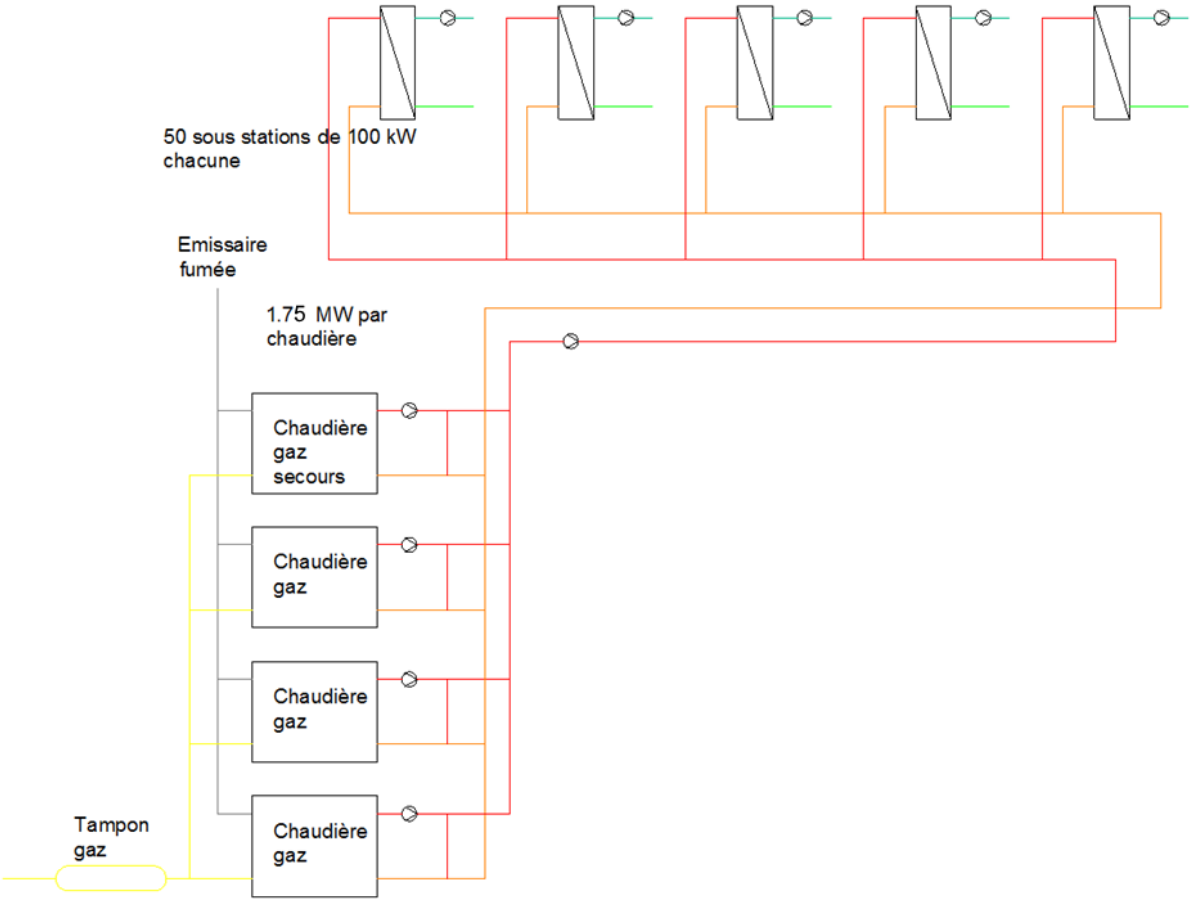


Figure 3-21 : Système S1-Cref : Schéma descriptif

3.3.2.4 Description du système de référence décentralisé S1-Dref1

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Chacun des 50 systèmes S1-Dref1 est ainsi composé de :

- 1 chaudière gaz de 100 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production par chaudière gaz permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 23%.

Ce système est reproduit 50 fois.

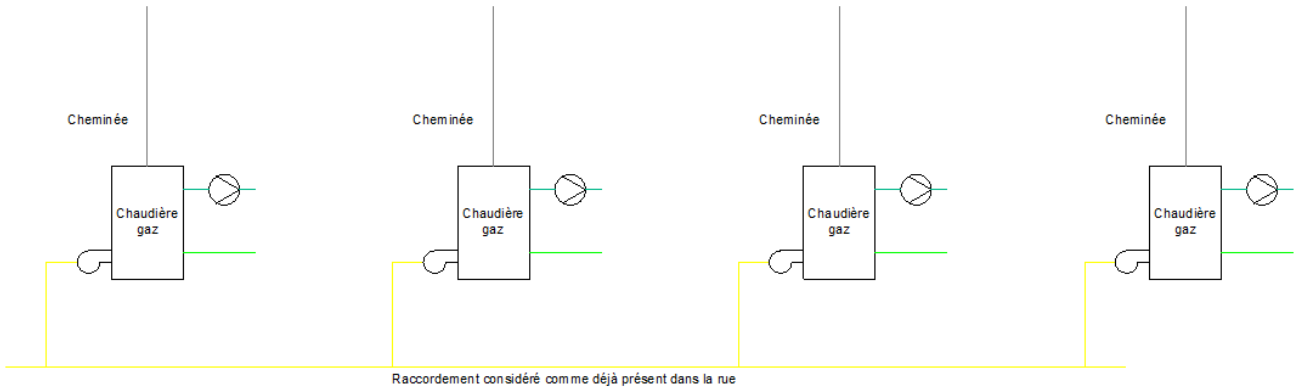


Figure 3-22 : Système S1-Dref1 : Schéma descriptif

3.3.2.5 Description du système de référence décentralisé S1-Dref2

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une pompe à chaleur aérothermique (§ 3.2.1.3).

Chacun des 50 systèmes S1-Dref2 est ainsi composé de :

- 1 PAC air/eau de 100 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale dont 95% sans l'appoint électrique) la production par PAC permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 23%.

Ce système est reproduit 50 fois.

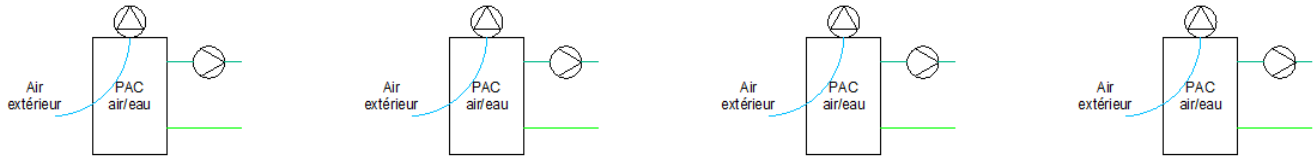


Figure 3-23 : Système S1-Dref2 : Schéma descriptif

3.4 Cas d'étude 2

Le cas d'étude 2 consiste à répondre aux besoins de chauffage et de froid d'un ensemble de 20 bâtiments. Il est défini de la manière suivante :

- Réseau de chaleur urbain ;
    - Puissance chaude au consommateur de 1 MW ;
        - 0,4 MW de logements dits neufs ;
        - 0,6 MW de bureaux dits neufs ;
    - Puissance chaude produite en centralisé de 1,05 MW ;
    - Secondaire de chaque sous-station 50/40°C ;
    - Réseau de chaleur 60/50°C ;
    - Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau à 60/50°C sur tout le réseau car la variation de température du au pertes thermique du réseau est inférieure à 1°C.
    - Raccordement considéré de 20 sous-stations de 50 kW chacune ;
- Réseau de froid urbain ;
    - Puissance froide au consommateur de 1 MW ;
        - 1 MW de bureaux dits neufs ;
    - Puissance froide produite en centralisé de 1,05 MW ;
    - Secondaire de chaque sous-station 7/12°C ;
    - Réseau de chaleur 5/10°C ;
    - Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau à 5/10°C sur tout le réseau car la variation de température dues aux pertes thermiques du réseau est inférieure à 1°C.
    - Raccordement considéré de 20 sous-stations de 50 kW chacune ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système renouvelable centralisé (S2-RC) : Réseau de chaleur et réseau de froid alimentés par un système de thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique ;
- Système de référence centralisé (S2-Cref) :
    - Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
    - Réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression ;
- Système de référence décentralisé 1 (S2-Dref1) :
    - Chaudières gaz par bâtiment ;
    - Groupe froid à compression par bâtiment ;
- Système de référence décentralisé 2 (S2-Dref2) : Thermo-frigo-pompe par bâtiment.

Ce type de système correspond à la construction d'un nouveau quartier en périphérie de la ville avec du logement collectif et des bureaux avec une grosse charge calorifique à évacuer et des forages sur nappe phréatique sous les bâtiments et à proximité. Il s'agit d'un cas assez fréquent en France Métropolitaine d'après l'ADEME.

3.4.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 2 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chauffage et le refroidissement de 20 bâtiments (puissance de chauffage totale souscrite de 1 MW, puissance de refroidissement souscrite de 1 MW), dans des conditions climatiques moyennes représentatives de la zone H2b, pendant une année, en régime 50/40°C dans le circuit de chauffage secondaire et en régime 7/12°C dans le circuit de refroidissement secondaire, avec une disponibilité minimum de 95 % »

La consommation annuelle est de : 1,8 GWh de chaleur et 2,4 GWh de froid.

3.4.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.4.2.1 Description du système renouvelable centralisé S2-RC

L'unité principale de production de chaleur et de froid pour ce système est une thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique (§ 3.2.1.6).

Le système S2-RC est ainsi composé de :

- Captage sur eau de nappe 0,1 MW ;
  - Environ 200 m² d'emprise au sol ;
- Thermo-frigo-pompes 0,3 MW chaud ;
  - Avec cette puissance chaude (31% de la puissance totale) la production pompe à chaleur permet de couvrir 83% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 56%.
  - Avec cette puissance froide (22% de la puissance totale) la production pompe à chaleur permet de couvrir 42% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 54%.
  - La couverture de la production de chaleur et de froid globale est de 60% du besoin.
- Secours et appoint chaudière gaz 3 x 350 kW (1,05 MW, dont 0,7 MW d'appoint) ;
- Secours et appoint groupe froid aérothermique 3 x 350 kW (1,05 MW, dont 1 MW d'appoint) ;
  - Tours aéroréfrigérantes 1,3 MW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 2000L en chaud et en froid ;
- Longueur du réseau de chaleur : 400 mètres linéaires ;
- Longueur du réseau de froid : 490 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur et de froid ;
  - 20 stations de 50 kW de chaleur,
  - 20 stations de 50 kW de froid.

Le fonctionnement de cette installation permettra de produire de la chaleur et du froid en simultané en doublant le coefficient de performance quand les besoins en chaleur et en froid se complètent. Quand ils ne se complèteront pas, le captage d'eau deviendra la source chaude ou froide complémentaire.

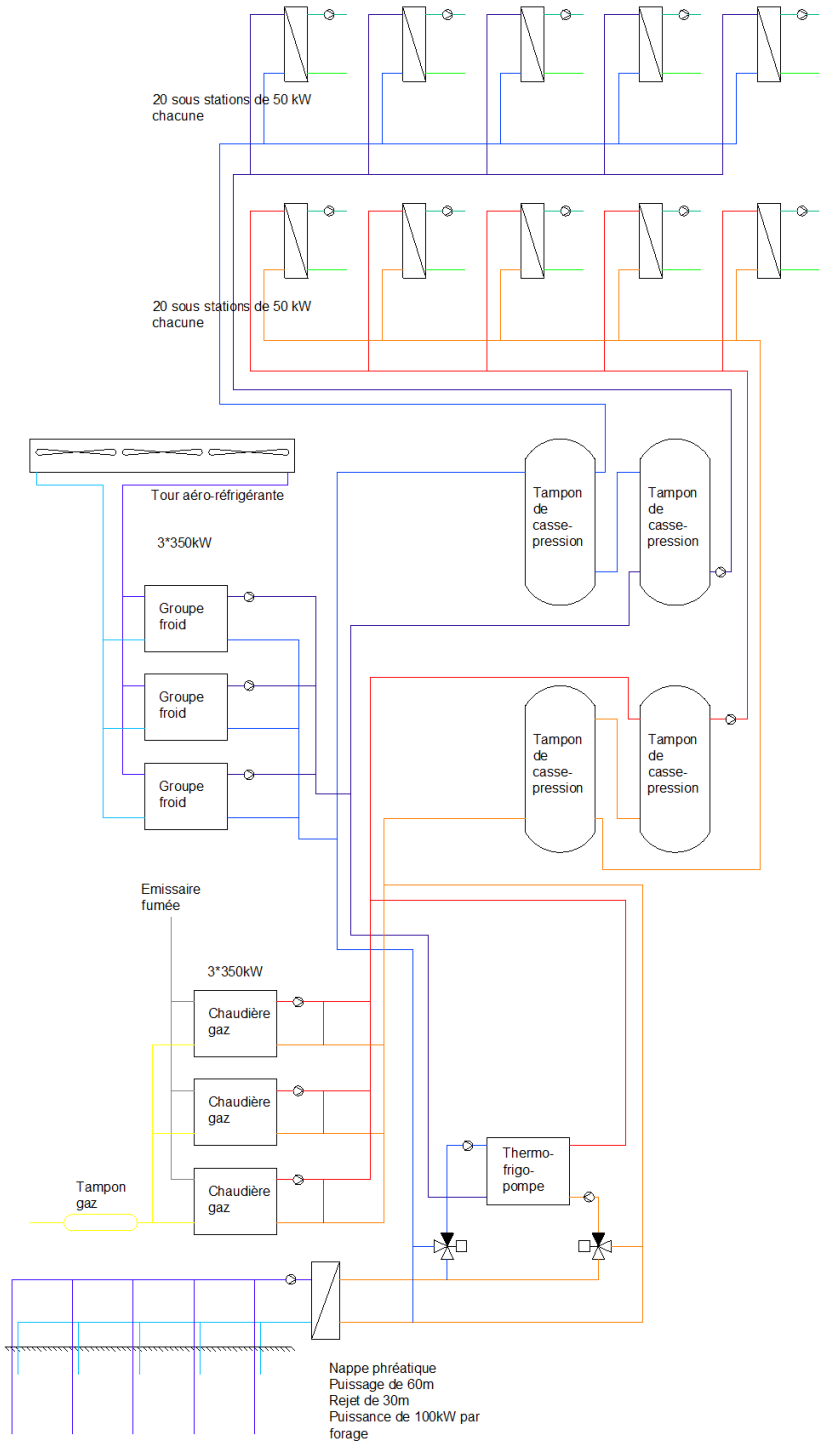


Figure 3-24 : S2-RC Schéma descriptif

3.4.2.2 Description du système de référence centralisé S2-Cref

Les unités principales de production de chaleur et de froid pour ce système sont une chaudière gaz (§3.2.1.9) et un groupe froid (§ 3.2.1.4).

Le système S2-Cref est ainsi composé, pour la partie chaude, de :

- Chaudière gaz 2 x 525 kW (1,05 MW) ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 21%.

- Secours chaudière gaz 525 kW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 2000L ;
- Longueur du réseau de chaleur : 400 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
    - 20 stations de 50 kW ;

Le système S2-Cref est ainsi composé, pour la partie froide, de :

- Tours aéroréfrigérantes 1,3 MW ;
- Groupe froid 2 x 525 kW (1,05 MW) ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 28%.
- Secours groupe froid aérothermique 525 kW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 2000L ;
- Longueur du réseau de froid : 490 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de froid ;
    - 20 stations de 50 kW.

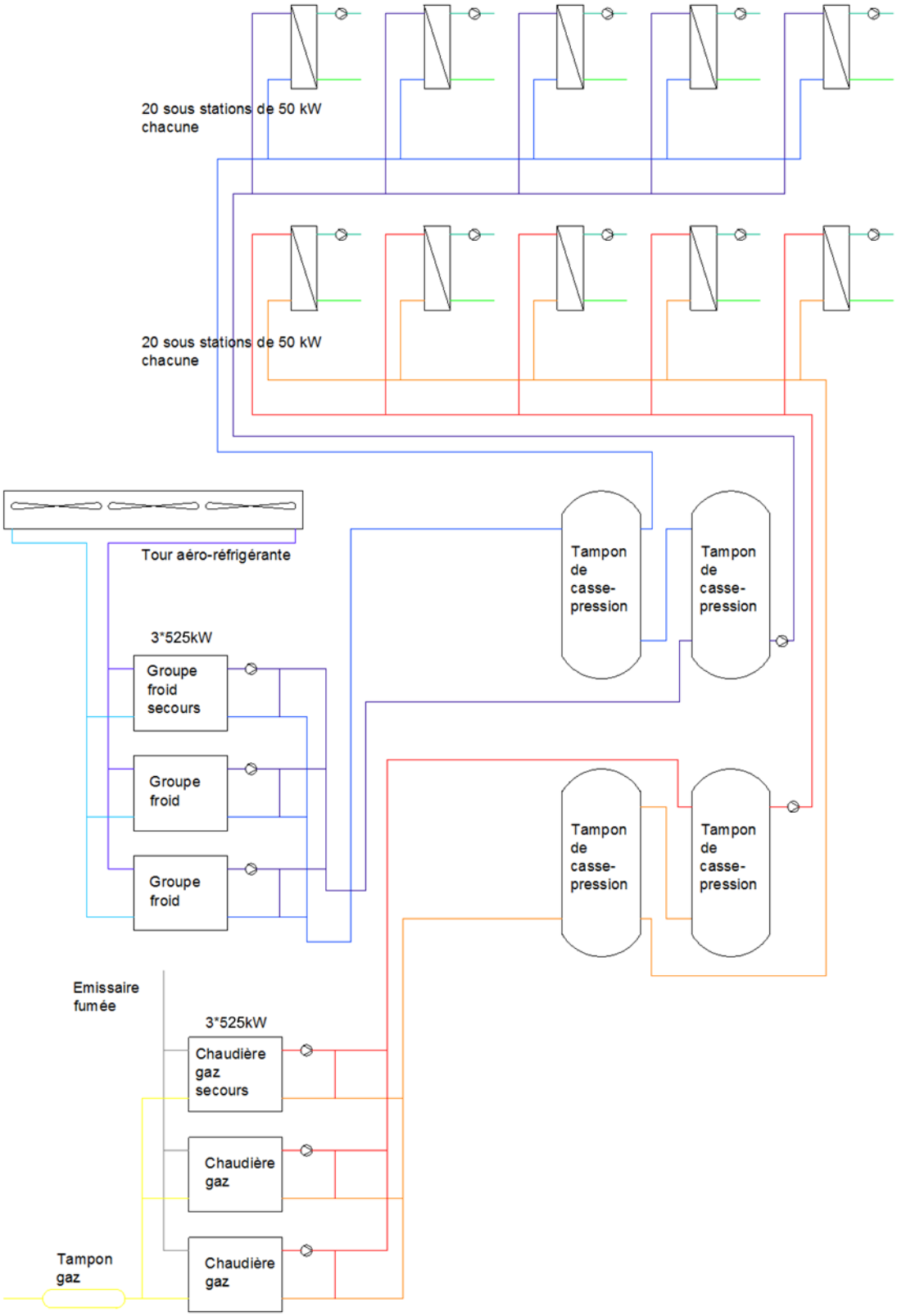


Figure 3-25 : Système S2-Cref : Schéma descriptif

3.4.2.3 Description du système de référence décentralisé S2-Dref1

Les unités principales de production de chaleur et de froid pour ce système sont une chaudière gaz (§3.2.1.9) et un groupe froid (§ 3.2.1.4).

Chacun des 20 systèmes S2-Dref1 est ainsi composé, pour la partie chaude, de :

- Chaudière gaz 50 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 21%.

Chacun des 20 systèmes S2-Dref1 est ainsi composé, pour la partie froide, de :

- Groupe froid aérothermique 50 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 28%.

Ce système est reproduit 20 fois.

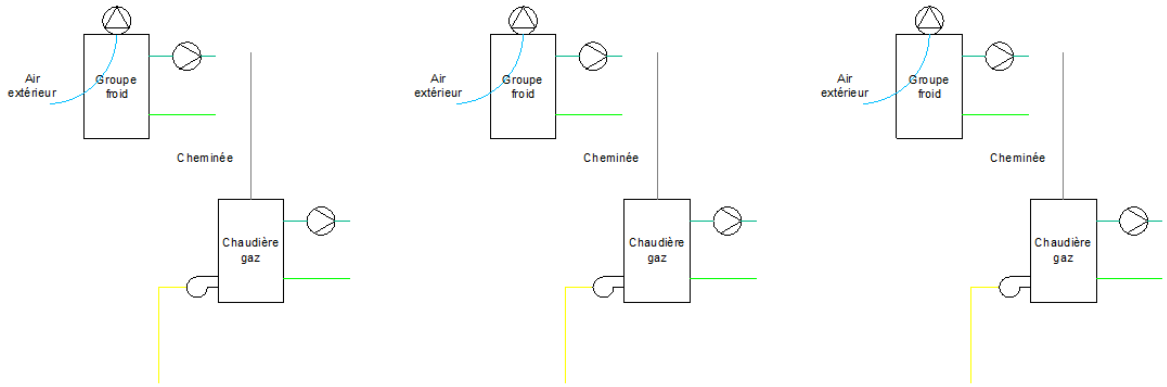


Figure 3-26 : Système S2-Dref1 : Schéma type (3 systèmes représentés, 20 modélisés)

3.4.2.4 Description du système de référence décentralisé S2-Dref2

L'unité principale de production de chaleur et de froid pour ce système est une thermo-frigo-pompe aérothermique (§ 3.2.1.6).

Dans ce système de référence, chaque client se compose d'une association entre un bâtiment de logement et un bâtiment de bureau. On suppose donc une proximité immédiate du client logement et du client bureau, qui donc ce regroupe pour la production de chaleur et de froid.

Le système S2-Dref2 est ainsi composé de :

- Tour aéroréfrigérante 50 kW ;
- Thermo-frigo-pompes 50 kW ;
    - Avec cette puissance chaude (139% de la puissance totale) la production pompe à chaleur permet de couvrir 100% du besoin en chaleur (104% de surpuissance rejetée) et à une charge moyenne annuelle de 32%.
    - Avec cette puissance froide (100% de la puissance totale) la production pompe à chaleur permet de couvrir 100% du besoin en chaleur (31% de surpuissance rejetée) et à une charge moyenne annuelle de 28%.
- Ce système est reproduit 20 fois.

Le fonctionnement de cette installation permettra de produire de la chaleur et du froid en simultané en doublant le coefficient de performance quand les besoins en chaleur et en froid se complètent. Quand

ils ne se complèteront pas, la tour aéroréfrigérante deviendra la source chaude ou froide complémentaire.

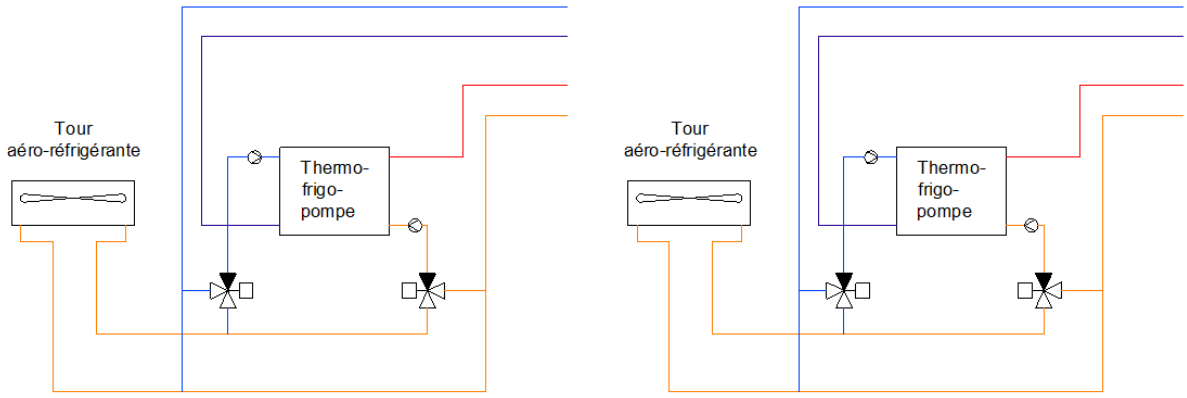


Figure 3-27 : S2-Dref2 : Schéma type

3.5 Cas d'étude 3

Le cas d'étude 3 consiste à répondre aux besoins de froid d'un ensemble de 10 bâtiments. Il est défini de la manière suivante :

- Réseau de froid urbain ;
- Puissance froide au consommateur de 1 MW ;
  - 0,3 MW de bâtiment dit public ;
  - 0,7 MW de bureau dit ancien ;
- Puissance froide produite en centralisé de 1,05 MW ;
- Secondaire de chaque sous-station 7/12°C ;
- Réseau de chaleur 5/10°C ;
  - Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau à 5/10°C sur tout le réseau car la variation de température dues aux pertes thermiques du réseau est inférieure à 1°C.
- Raccordement considéré de 10 sous-stations de 100 kW chacune ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système renouvelable centralisé (S3-RC) : Réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique ;
- Système de référence centralisé (S3-Cref) : Réseau de froid alimenté par un groupe froid sur tour aéroréfrigérante ;
- Système de référence décentralisé (S3-Dref) : Groupe froid aérothermique par bâtiment.

Ce type de système correspond à la mise en place d'un réseau de froid pour des bâtiments existants de la ville avec du logement collectif, des sondes géothermiques ou des forages sur nappe phréatique sous les bâtiments et à proximité et quelques locaux de bureaux. Selon l'ADEME, il existe actuellement 23 réseaux de froid en France, alimentant principalement des bureaux et des bâtiments publics.

3.5.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 3 est la suivante :

« Couvrir les besoins de refroidissement de 10 bâtiments (puissance de refroidissement souscrite de 1 MW), dans des conditions climatiques moyennes représentatives de la zone H2b, pendant une année, en régime 7/12°C dans le circuit de refroidissement secondaire, avec une disponibilité minimum de 95 % »

La consommation annuelle est de : 2,8 GWh de froid.

3.5.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.5.2.1 Description du système renouvelable centralisé S3-RC

L'unité principale de production de froid pour ce système est une centrale de production de froid à absorption sur nappe phréatique (§ 3.2.1.5).

Le système S3-RC est ainsi composé de :

- Forage dans la nappe d'environ 0,8 MW (forage de prélèvement et forage de réinjection) ;
    - 1600 m² d'emprise au sol ;
- Chaleur fatale à une température de 100°C (la source peut être une usine de valorisation énergétique de déchet ou un industriel à proximité) ;
- Groupe froid à absorption 315 kW ;
    - Avec cette puissance (30% de la puissance totale) la production permet de couvrir 83% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 86%.
- Secours et appoint : 2 groupes froid aérothermiques de 525 kW (1,05 MW, dont 0,7 MW d'appoint) ;
    - Tour aéroréfrigérante de 1,25 MW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 2000L ;
- Longueur du réseau de froid : 550 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de froid ;
    - 10 stations de 100 kW.

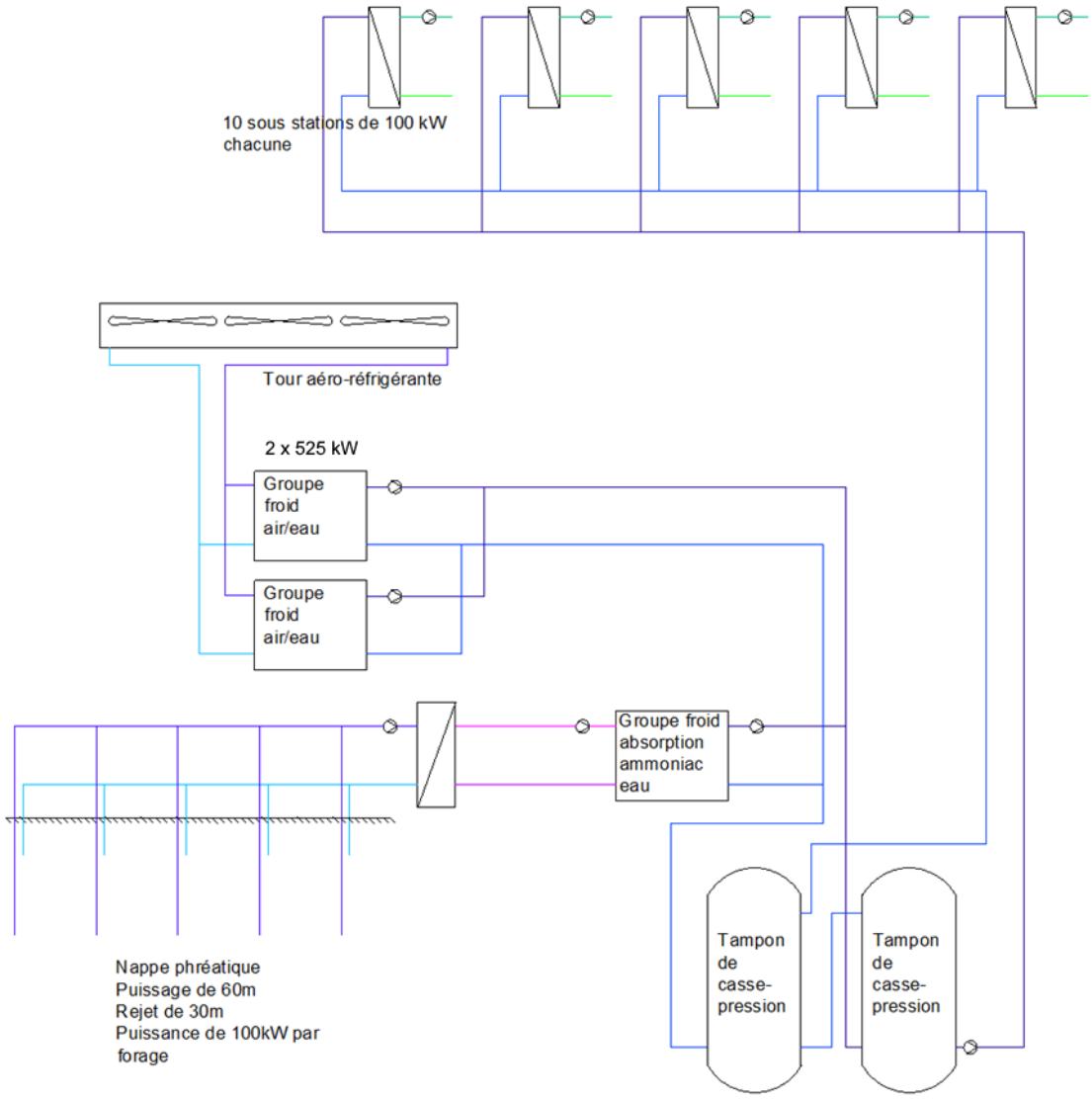


Figure 3-28 : S3-RC : Schéma descriptif

3.5.2.2 Description du système de référence centralisé S3-Cref

L'unité principale de production de froid pour ce système est une centrale de production de froid a compression sur air (§ 3.2.1.4).

Le système S3-Cref est ainsi composé de :

- Forage dans la nappe d'environ 1,3 MW (forage de prélèvement et forage de réinjection) ;
  - 2510 m2 d'emprise au sol ;
- Groupe froid à compression 1,05 MW (2 groupes de 525 kW) ;
  - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 31%.
- Secours groupe froid à compression 525 kW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 2000L ;
- Longueur du réseau de froid : 550 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de froid ;
  - 10 stations de 100 kW.

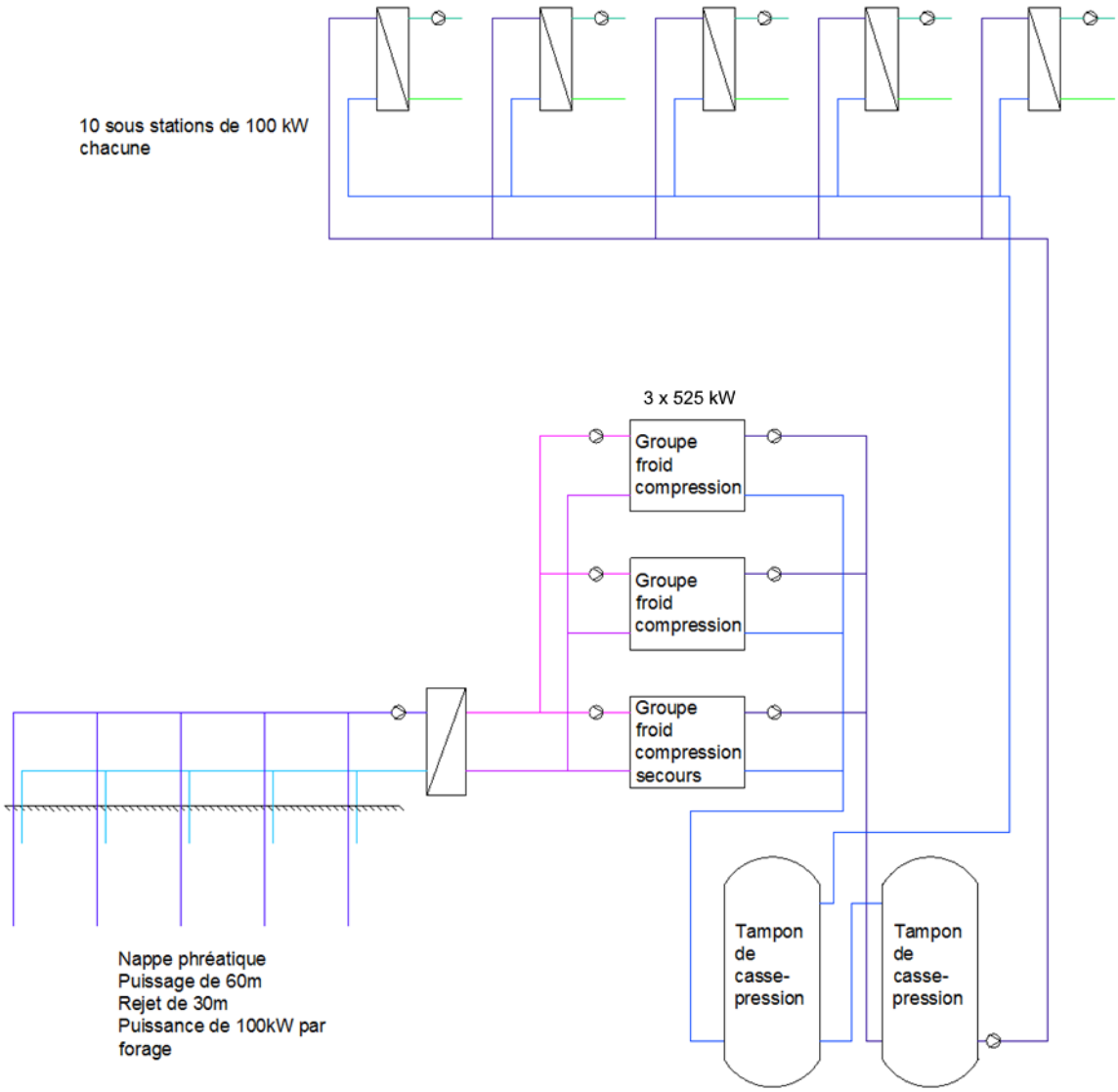


Figure 3-29 : Système S3-Cref : Schéma type

3.5.2.3 Description du système de référence décentralisé S3-Dref

L'unité principale de production de froid pour ce système est une centrale de production de froid à compression sur air (§ 3.2.1.4).

Le système S3-Dref est ainsi composé de :

- Groupe froid à compression sur air 100 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 31%.

Ce système est reproduit 10 fois.

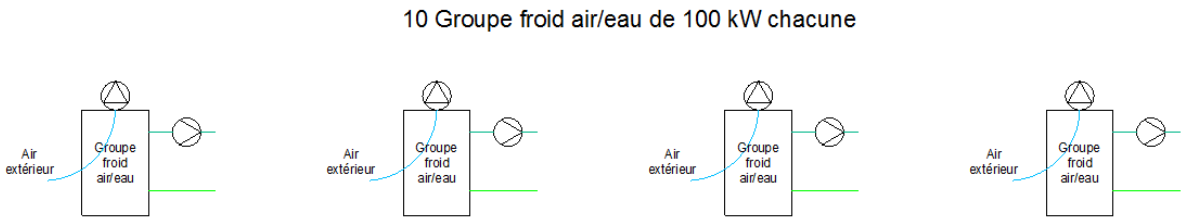


Figure 3-30 : Système S3-Dref : Schéma type

3.6 Cas d'étude 4

Le cas d'étude 4 consiste à répondre aux besoins de chauffage d'un ensemble de 20 bâtiments. Il est défini de la manière suivante :

- Réseau de chaleur urbain ;
- Puissance chaude au consommateur de 2,6 MW ;
  - 2,6 MW de logement dit neuf ;
- Puissance chaude produite en centralisé de 2,73 MW ;
- Secondaire de chaque sous-station 50/40°C ;
- Réseau de chaleur 60/50°C ;
- Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau à 60/50°C sur tout le réseau car la variation de température du au pertes thermique du réseau est inférieure à 1°C.
- Raccordement considéré de 20 sous-stations de 130 kW chacune ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système renouvelable centralisé (S4-RC) : Réseau de chaleur alimenté par une centrale solaire thermique avec capteur double vitrage et stockage inter saisonnier ;
- Système de référence centralisé (S4-Cref) : Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- Système de référence décentralisé 1 (S4-Dref1) : Chaudières gaz par bâtiment ;
- Système de référence décentralisé 2 (S4-Dref2) : Capteur solaire thermique par bâtiment avec appoint gaz.

Ce type de système correspond à la mise en place d'un réseau de chaud pour un nouveau quartier en périphérie de la ville avec du logement collectif, et de la place autour pour disposer un champ de capteur solaire thermique. Il existe uniquement deux projets de grande centrale solaire thermique sur réseaux de chaleur couvrant plus de 85% des besoins. Le système étudié pour ce cas d'étude est donc un scénario de type excellence, qui n'est pas représentatif de ce qui est le plus courant actuellement.

3.6.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 4 est la suivante :

« Couvrir 100% des besoins de chauffage et d'ECS de 20 bâtiments (puissance totale souscrite de 2,6 MW), dans des conditions climatiques moyennes représentatives de la zone H2b, pendant une année, en régime 50/40°C dans le circuit de chauffage secondaire, avec une disponibilité minimum de 95 % »

La consommation annuelle est de : 4,7 GWh de chaleur.

3.6.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.6.2.1 Description du système renouvelable centralisé S4-RC

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une centrale solaire thermique (§ 0).

Les systèmes solaires thermiques avec une couverture énergétique supérieure à 85% sont encore peu développés. Une grande capacité de stockage thermique inter-saisonnier est nécessaire pour atteindre un taux de couverture aussi élevé. Un tel système a été mis en œuvre dans le cadre du projet Drake Landing Solar Community, un projet de *Natural Resources Canada* basé à Okotoks. Les conditions climatiques entre la France et le Canada sont très différentes, un tel système ne serait pas dimensionné de la même manière s'il était déployé en France. Le système ne peut donc pas être transposé tel quel pour la France, et les hypothèses de dimensionnement (nombre de capteurs et capacité de stockage) doivent être adaptés.

Présentation du projet Drake Landing

Le modèle choisi est celui de Drake Landing Solar Community, un projet de Natural Resources Canada basé à Okotoks pour l'alimentation en chauffage de 52 bâtiments grâce à des collecteurs solaires sur les toits des garages et à un stockage inter-saisonnier pour garantir une couverture annuelle à 100 % des besoins de chauffage pour les meilleures années. Le fonctionnement de ce système est décrit dans la figure ci-dessous. Le système de Drake Landing est ainsi composé de :

- Champs de capteurs solaires : 2293 m² de collecteurs solaires capteur plan
- Stockage d'énergie saisonnier enterré : 144 sondes de 35 m pour échangeur thermique
- Secours chaudière gaz
- Réseau de 1 020 mètres linéaires
- Stockage court-terme : 2 ballons de 120 m^3
- Clients du réseau de chaleur ;
    - 52 stations

Ce système centralisé n'est utilisé que pour assurer les besoins de chauffage. En plus de cela, chaque bâtiment a son propre système de production d'ECS, qui comprend des panneaux solaires thermiques et une chaudière gaz.

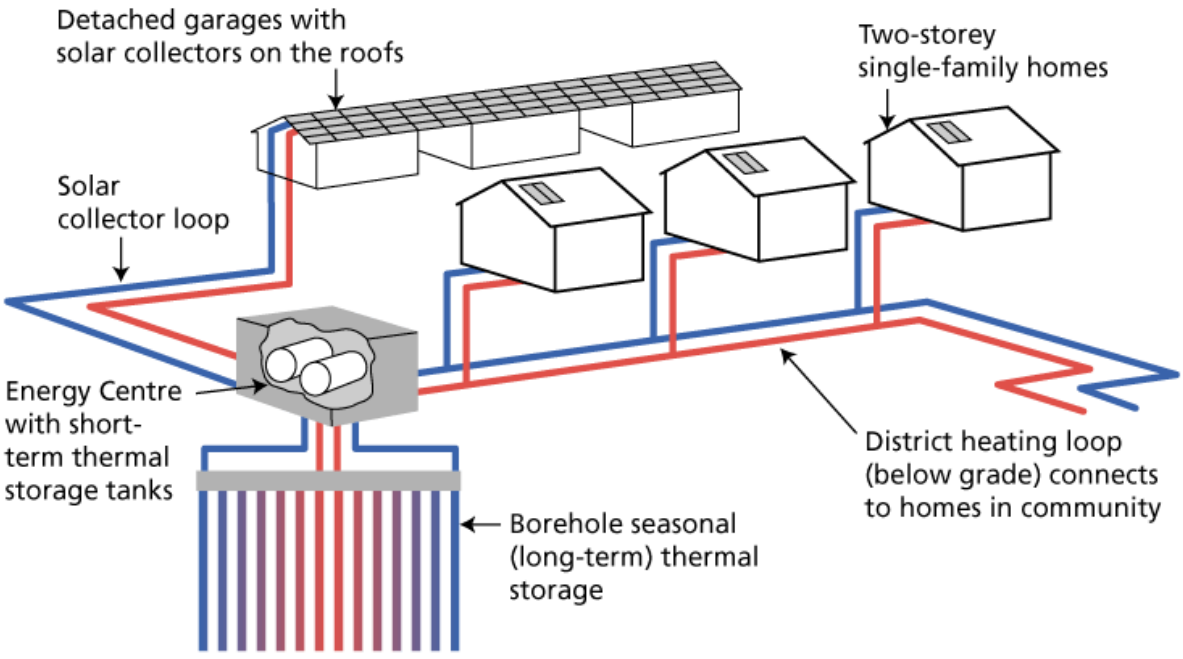


Figure 3-31 : Schéma simplifié de l'installation de Drake Landing Solar Community

Une description plus détaillée de ce système est disponible sur le site Internet du projet : www.dlsc.ca

Dimensionnement d'un système adapté au contexte français

Le dimensionnement d'un système comme celui-ci est relativement complexe : la capacité des stockages de court et de long terme dépend beaucoup des différences entre la demande en chaleur des logements et la production des capteurs solaires. Pour dimensionnement son système, Natural

Ressources Canada a développé un modèle sous le logiciel TRNSYS, qu'ils ont accepté de transmettre à l'ADEME. Il a alors été possible d'adapter ce modèle pour dimensionner un système équivalent adapté au contexte climatique français.

Le modèle TRNSYS transmis par Natural Ressources comporte un certain nombre d'éléments non paramétrables qu'il n'aurait pas été possible de modifier sans des changements lourds. C'est notamment le cas de la taille des ballons de stockage de court terme ou des caractéristiques des sondes utilisées pour le stockage long-terme. La puissance de chauffage à fournir dans ce cas d'étude, définie par l'ADEME (logements collectifs), correspond à 5,4 fois la puissance fournie par le système Drake Landing (maisons individuelles). Le travail d'adaptation du modèle a donc été fait à puissance constante, puis les équipements ont été reproduits 5,4 fois pour couvrir le besoin défini.

Plusieurs modifications ont été apportées au modèle :

- D'une part, les données d'ensoleillement ont été modifiées pour être représentatives de la situation française (zone H2b, année 2017).
- D'autre part, le profil de consommation des bâtiments a été modifié pour qu'il corresponde à celui de bâtiments français (zone H2b, année 2017). Seule la demande en chauffage des bâtiments a été prise en compte. Comme pour le projet original, l'ECS est produite au niveau de chaque bâtiment.

Selon le taux de couverture solaire souhaité, plusieurs dimensionnements sont possibles. Le modèle permet de faire varier le nombre de capteurs solaires et la capacité de stockage thermique, et de calculer l'indice de couverture solaire obtenu. Le tableau ci-dessous présente les résultats d'indice de couverture solaire à la dixième année en fonction du volume de stockage (i.e. ici nombre de sondes) et de la surface solaire (i.e. ici nombre de panneaux).

Tableau 3-9 : Couverture solaire obtenue, en fonction du nombre de sondes et du nombre de panneaux

Nombre de panneaux / Nombre de sondes	**140**	**105**	**84**	**70**	**42**
144	100%	100%	99%	94%	75%
108	100%	100%	98%	93%	75%
87	100%	100%	97%	92%	75%
72	100%	99%	96%	91%	75%
43	98%	96%	92%	87%	72%

Afin de pouvoir optimiser le ratio solaire/stockage sans surdimensionner, une régression logarithmique sous le logiciel statistique appelé R [19] a permis d'estimer la couverture solaire avec la formule suivante :

$$\frac{1}{1 + e^{-(0.298 + 0.002857 * nb_{panneaux} - 0.0166 * nb_{sondes} + 0.00007252 * nb_{panneaux} * nb_{sondes})}}$$

La figure ci-dessous présente les données de couverture solaires simulées avec TRNSYS (points) et calculés à l'aide de la régression logarithmique (ligne). L'ordonnée correspond au taux de couverture solaire du besoin de chauffage, l'abscisse à la surface de capteurs solaires, et la légende au nombre de sondes.

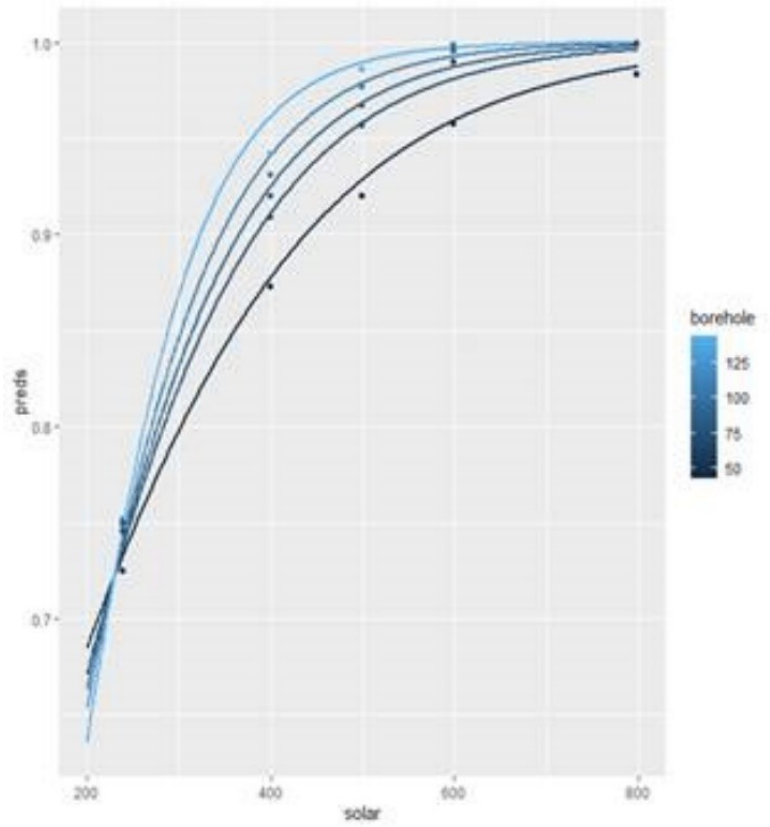


Figure 3-32 - Comparaison des résultats simulés sous TRNSYS et des résultats de régression pour la couverture solaire en fonction du nombre de sondes et du nombre de panneaux

L'ADEME souhaitait atteindre un taux de couverture solaire de 90 %, en englobant à la fois les besoins de chauffage et d'ECS. Pour cela, un taux de couverture de 97 % doit être atteint sur le système centralisé qui sert uniquement au chauffage. Une optimisation sous contrainte a été réalisée pour minimiser le nombre de sondes et de panneaux solaires (poids identiques aux deux systèmes) en conservant un taux de couverture à 97 %. Avec cette approche, l'optimum est atteint pour :

- 84 panneaux de 16 m² ;
- 108 sondes de 35 m.

Sur cette base, le reste du système a été adapté :

- la longueur du circuit primaire post-capteurs, ainsi que le volume de glycol et les consommations des pompes associées ont été adaptés à la taille totale des panneaux ;
- le nombre de forages et la longueur des raccordements inter-sondes (et les consommations des pompes associées) ont été adaptés au nombre de sondes.

Le modèle TRNSYS permet ensuite de récupérer les consommations des différents postes électriques (pompes) ainsi que la nécessité de complément gaz à la dixième année.

Enfin, une dernière adaptation a été réalisée : afin de couvrir la demande totale des 20 bâtiments résidentiels neufs, ce système est reproduit 5,4 fois.

Synthèse des caractéristiques retenues pour le système S4-RC

Le système S4-RC est ainsi composé de :

- Un système de chauffage centralisé qui couvre les besoins de chauffage de 20 bâtiments :
  - Champs de capteurs solaires : 7260 m² de collecteurs solaires capteur plan
  - Stockage d'énergie saisonnier enterré : 583 sondes de 35 m pour échangeur thermique
  - Secours chaudière gaz : 6 chaudières de 0,6 MW
  - Réseau de 1 km linéaire
  - Stockage court-terme : 12 ballons de 120 m^3

- Des systèmes centralisés de production d'ECS :
  - 20 chaudières de 8 kW
  - 20 installations de 80 m² de panneaux solaires

A noter que ce dimensionnement est une extrapolation du système utilisé pour Drake Landing, en adaptant le modèle existant. Un dimensionnement en partant d'une page blanche aurait pu être très différents (stockages court terme de plus grande taille, sondes plus profondes, etc.). Cependant, le travail nécessaire à un tel dimensionnement n'était pas compatible avec les contraintes budgétaires de la présente étude, et nous avons dû nous contenter d'une adaptation du modèle existant.

3.6.2.2 Description des systèmes de référence centralisés S4-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Le système S4-Cref est ainsi composé de :

- 2 chaudières gaz de 1,37 MW chacune ;
  - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production par chaudière gaz permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 21%.
- Appoint chaudière gaz 1,37 MW ;
- Longueur du réseau de chaleur : 1000 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
  - 20 sous-stations de 130 kW.

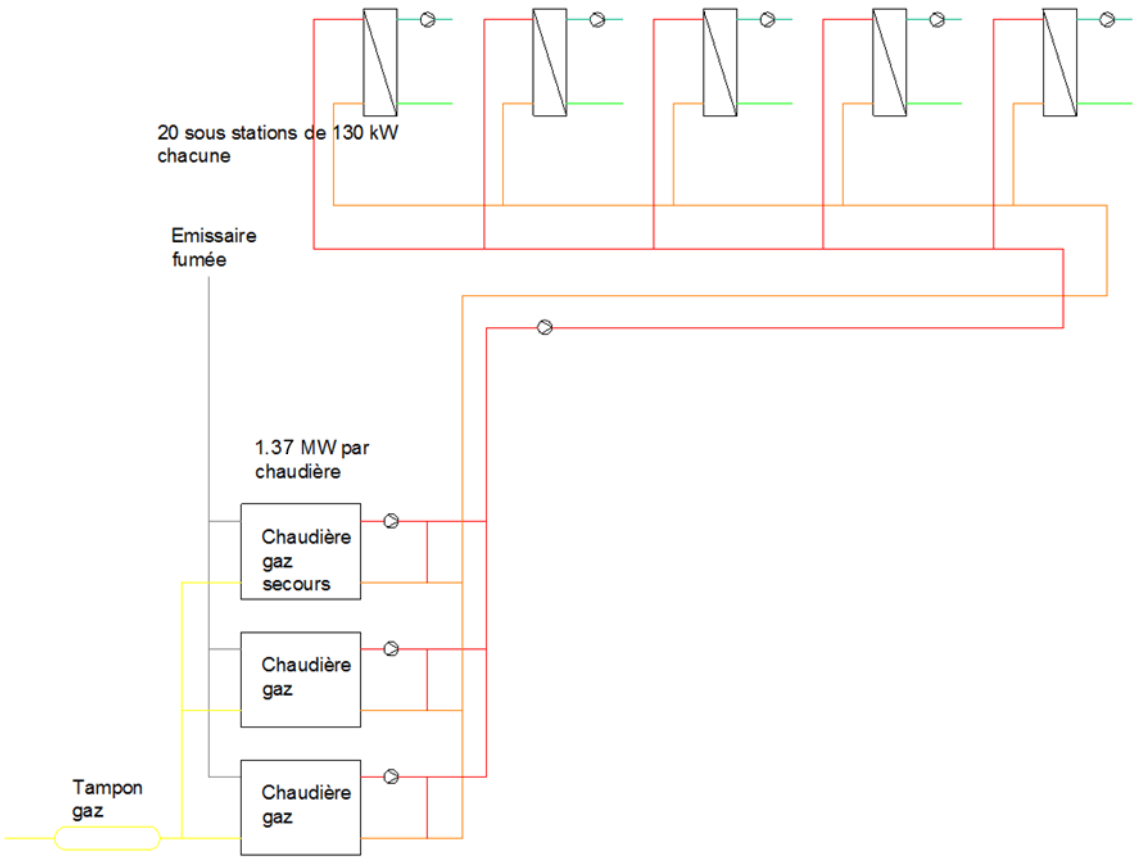


Figure 3-33 : Système S4-Cref : Schéma type

3.6.2.3 Description des systèmes de référence décentralisés S4-Dref1

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Le système S4-Dref1 est ainsi composé de :

- 1 chaudière gaz de 130 kW;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production par chaudière gaz permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 21%.

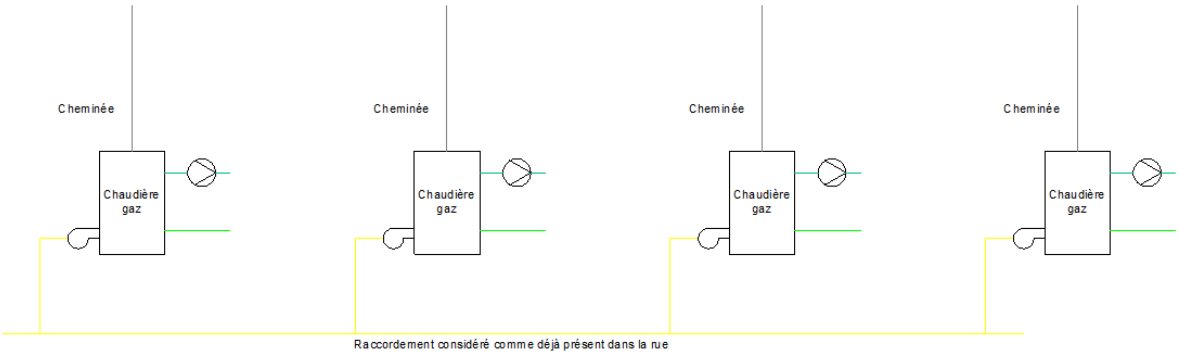


Figure 3-34 : Système S4-Dref1 : Schéma type

3.6.2.4 Description des systèmes de référence décentralisé S4-Dref2

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une centrale solaire thermique (§ 3.2.1.8).

Le système S4 Dref2 est ainsi composé de :

- Champs de capteurs solaires de 150m² (59 panneaux de 2.555 m2 de surface brute chacun) ;
    - Avec cette surface la production par capteur solaire permet de couvrir 34% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 22% (concept de charge peu représentatif en solaire).
- Secours et appoint chaudière gaz 130 kW ;

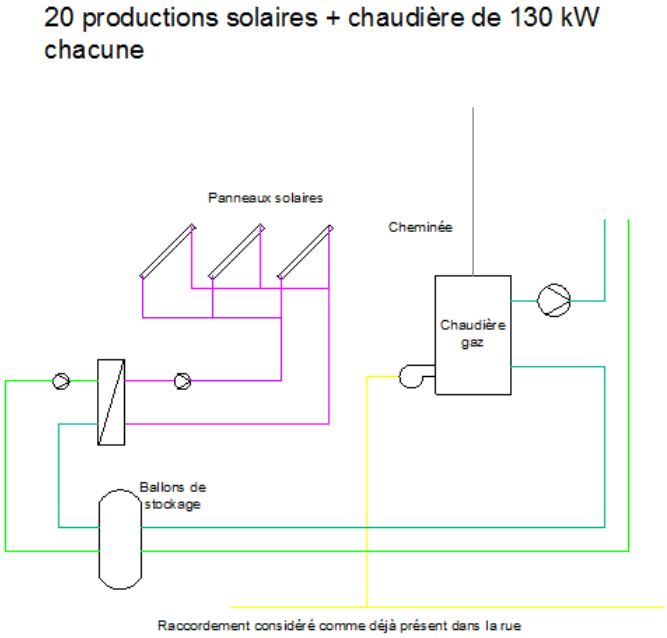


Figure 3-35 : Système S4-Dref2 : Schéma type

3.7 Cas d'étude 5

Le cas d'étude 5 consiste à répondre aux besoins de froid d'un industriel. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance froid de 2 MW en 3/8h ;
- Besoin en froid positif avec un régime de 7/12°C.

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système renouvelable S5-R : Centrale composé d'un groupe froid à absorption Eau / Bromure de Lithium sur nappe phréatique ;
- Système de référence S5-Cref : Centrale composé d'un groupe froid à compression sur nappe phréatique.

Le cas d'étude correspond à la climatisation d'un procédé industriel de conservation en froid positif, de refroidissement de moteurs, de refroidissement de bain de traitement des métaux ou d'un refroidissement d'un datacenter.

3.7.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 5 est la suivante :

« Couvrir les besoins d'eau glacée pour un procédé industriel fonctionnant en 3x8h, en régime 7/12°C (puissance de refroidissement de 2 MW), pendant une année »

La consommation annuelle est de : 14,8 GWh de froid.

3.7.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.7.2.1 Description du système S5-R

L'unité principale de production de froid pour ce système est une centrale de production de froid à absorption Eau / Bromure de Lithium sur nappe phréatique (§ 3.2.1.5).

Le système S5-R est ainsi composé de :

- Captage sur eau de nappe 1 MW (100kW par doublet de forage) ;
- Source de chaleur fatale à 100°C ;
- Groupe froid à absorption Eau / Bromure de Lithium, 2,0 MW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en froid et à une charge moyenne annuelle de 84%.
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 4000L ;

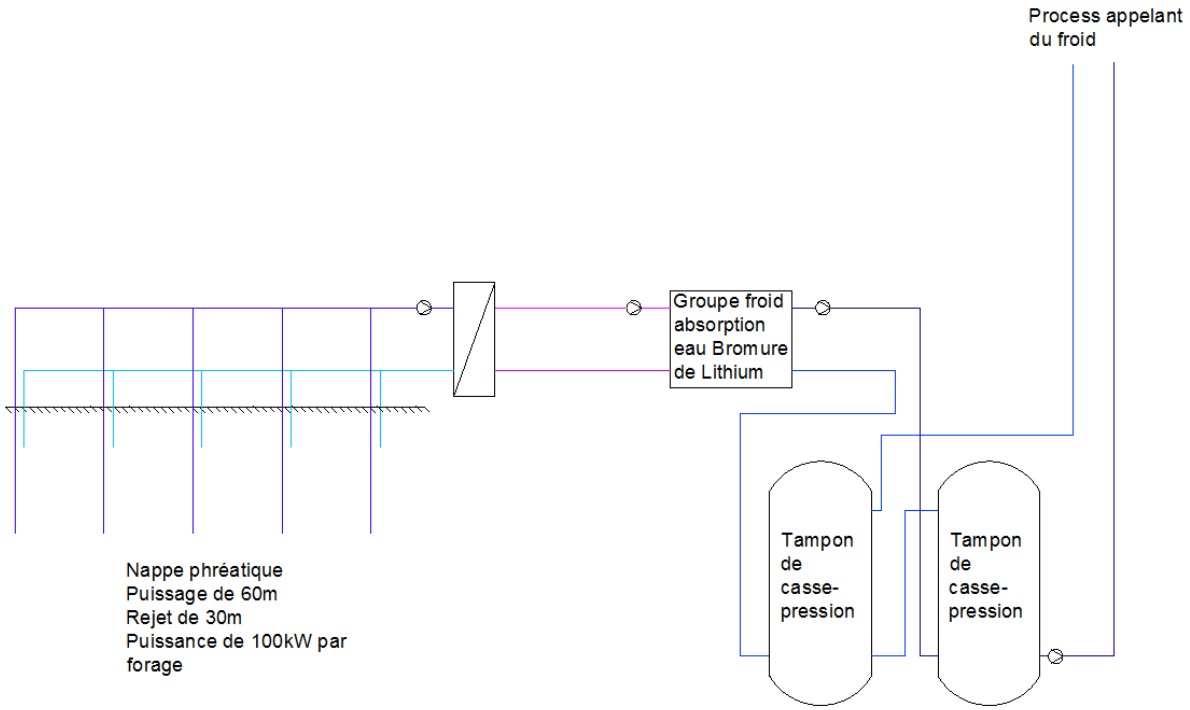


Figure 3-36 : Système S5-R : Schéma type

3.7.2.2 Description du système S5-Cref

L'unité principale de production de froid pour ce système est une centrale de production de froid à compression sur nappe phréatique (§ 3.2.1.4).

- Groupe froid à compression
    - Cette solution se compose de :
        - Captage sur eau de nappe 2,3 MW[9] ;
        - 1 groupe froid à compression sur nappe de 2 MW ;
        - Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 4000L ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 84%.

[9] Du fait d'un coefficient de performance plus faible du groupe froid à compression, un captage de plus grande puissance est nécessaire pour le système S5-Cref que pour le système S5-R.

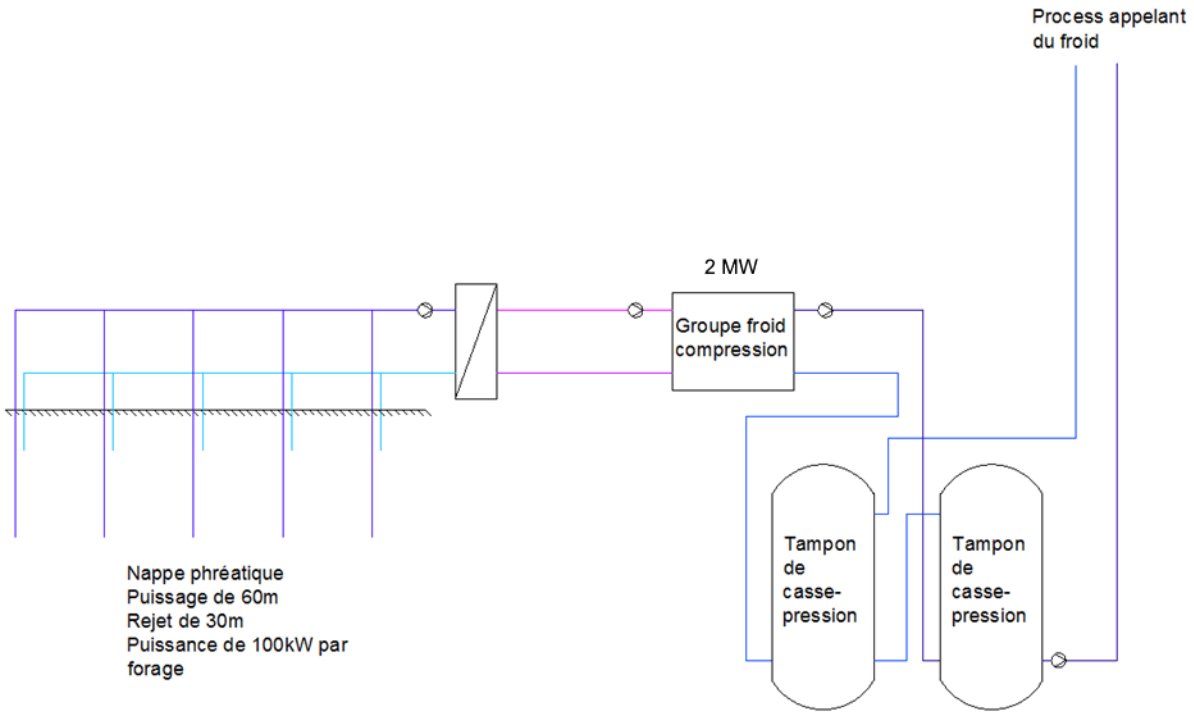


Figure 3-37 : Système S5-Cref : Schéma type

3.8 Cas d'étude 6

Le cas d'étude 6 consiste à répondre aux besoins de chaleur d'un industriel. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance chaude de 250 kW en 3x8h ;
- Besoin en chaleur avec un régime de 55/35°C (relève de température d'un procédé) ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système S6-R : Pompe à chaleur fonctionnant à l'ammoniac sur nappe phréatique ;
- Système S6-Cref : Chaudière gaz à condensation.

Le cas d'étude correspond au chauffage d'un procédé industriel de séchage, au pré chauffage d'un tunnel de cuisson, de chauffage d'un bain pour un traitement de métaux, de réchauffage de liquide ou gaz froid (chauffage du GNL).

3.8.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 6 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chaleur d'un procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h, nécessitant une relève de température de 35°C à 55/60°C (puissance de chauffage de 250 kW), pendant une année »

La consommation annuelle est de 1,8 GWh de chaud.

3.8.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.8.2.1 Description du système S6-R

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une pompe à chaleur à ammoniac sur nappe phréatique (§ 3.2.1.5).

Le système S6-R est ainsi composé de :

- Captage sur eau de nappe 250 kW (3 doublets de forage permettant d'échanger 100 kW chacun) ;
    - 500 m² d'emprise au sol ;
- Pompe à chaleur à ammoniac 250 kW ;
- Ballons tampons de découplage d'une capacité de 4 L/kW soit 2 ballons de 500L ;

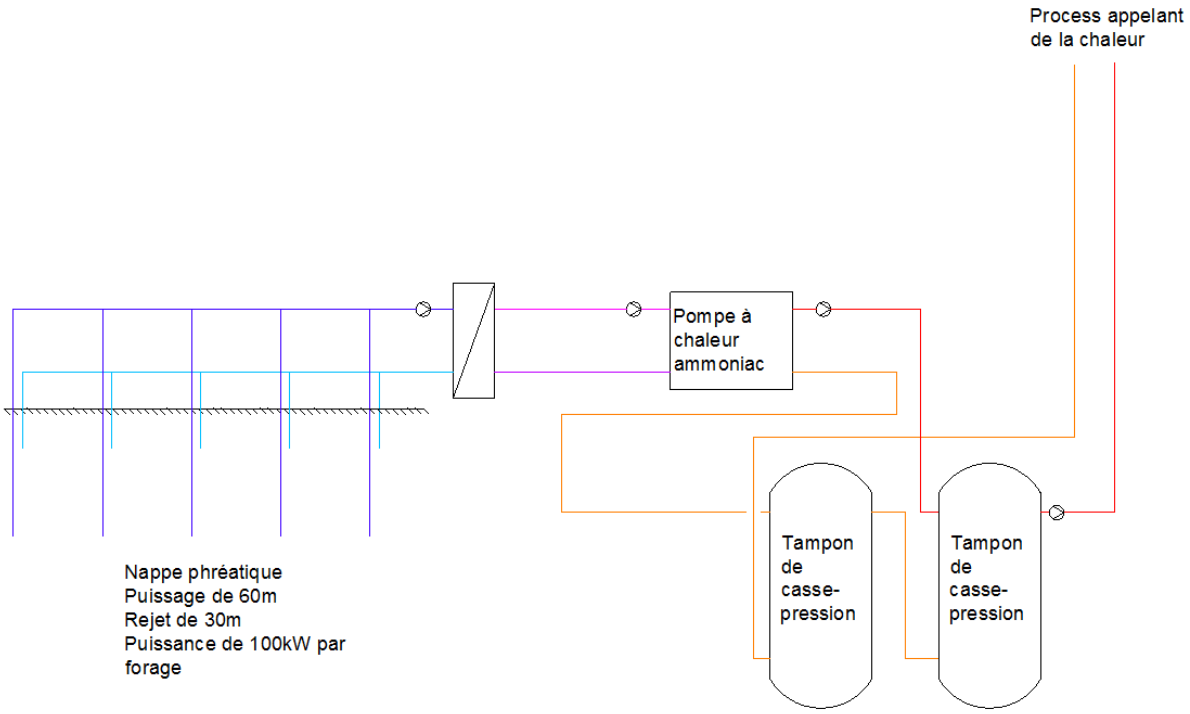


Figure 3-38 : Système S6-R : Schéma type

3.8.2.2 Description du système S6-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

- Chaudière gaz
    - Cette solution se compose de :
        - Alimentation en gaz et cheminée ;
        - Une chaudière gaz de 250 kW.

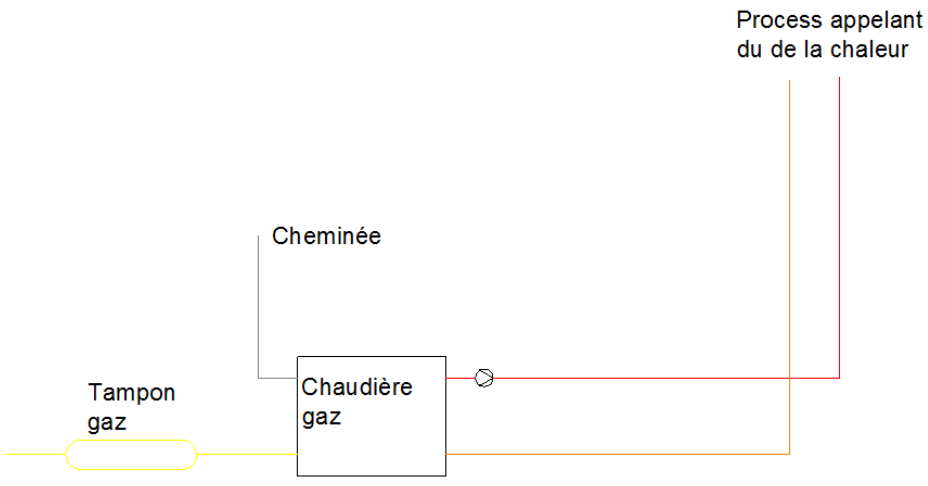


Figure 3-39 : Système S6-Cref : Schéma type

3.9 Cas d'étude 7

Le cas d'étude 7 consiste à répondre aux besoins de chaleur d'un industriel. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance chaude de 1,7MW ;
- Besoin en chaleur avec un régime de 92/55°C (relève de température d'un procédé) ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système S7-R : Pompe à chaleur hybride (cycle absorption ammoniac/eau et cycle compression à l'ammoniac) sur nappe phréatique utilisant de la chaleur fatale ;
- Système S7-Cref : Chaudière gaz de 1,7MW.

Le cas d'étude correspond au chauffage d'un procédé industriel de séchage, au pré chauffage d'un tunnel de cuisson, de chauffage d'un bain pour un traitement de métaux, de réchauffage de liquide ou gaz froid ou d'un procédé de stérilisation.

3.9.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 7 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chaleur d'un procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h, nécessitant une relève de température de 50°C à 92°C (puissance de chauffage de 1,7 MW), pendant une année »

La consommation annuelle est de : 12 GWh de chaud.

3.9.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.9.2.1 Description du système S7-R

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une centrale de production de chaleur hybride mêlant machine à absorption et à compression et alimenté en chaleur fatale (§ 3.2.1.4 & § 3.2.1.5)

Le système S7-R est ainsi composé de :

- Pompe à chaleur 1.7MW
    - Source de chaleur basse température 50°C

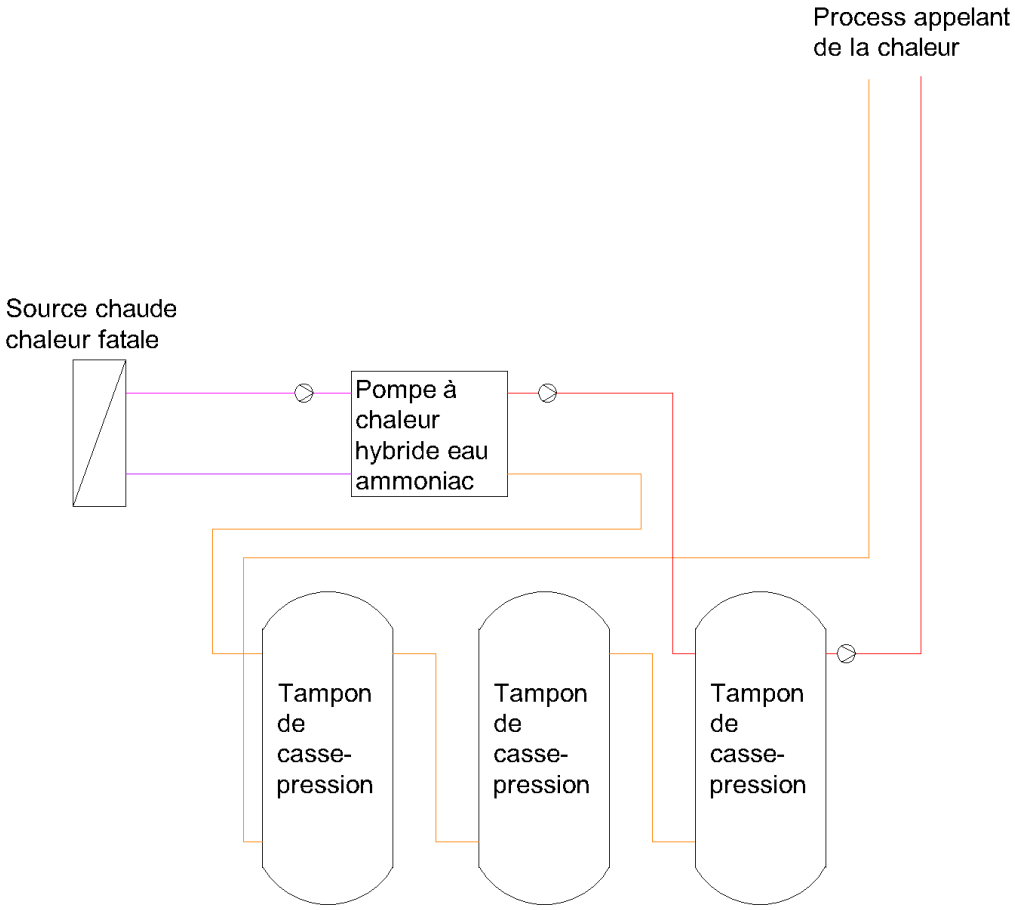


Figure 3-40 : Système S7-R : Schéma type

3.9.2.2 Description du système S7-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Cette solution se compose de :

- Alimentation en gaz et cheminée ;
- Une chaudière gaz de 1,7MW,

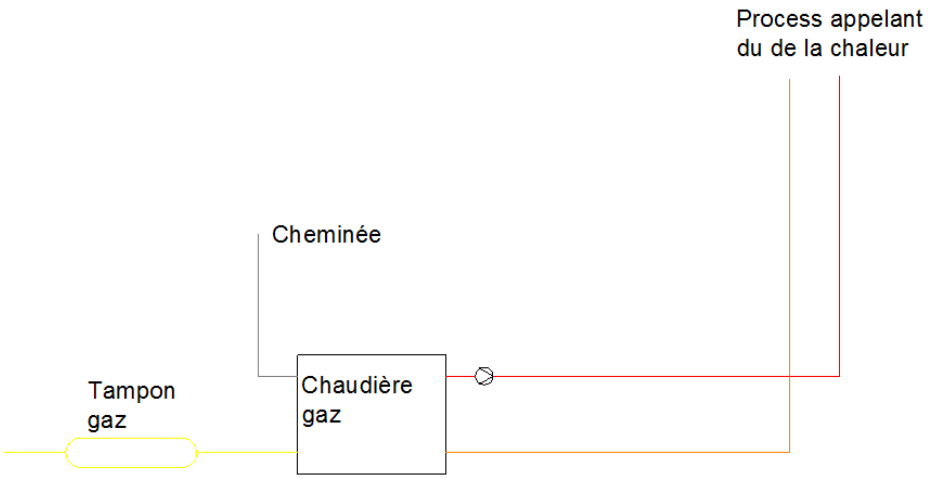


Figure 3-41 : Système S7-Cref : Schéma type

3.10 Cas d'étude 8

Le cas d'étude 8 consiste à répondre aux besoins de chaleur et de froid d'un industriel de type laiterie, fromagerie, charcuterie, abattoir avec un besoin de froid en base pour le conditionnement et un besoin en chaleur pour le nettoyage. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance chaude de 1,1 MW ;
- Puissance froide de 0,8 MW ;
- Besoin en chaleur avec un régime de 55/50°C ;
- Besoin en froid avec un régime de -11/-4°C.

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système S8-R : groupe froid avec de l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante ;
- Système S8-Cref : Chaudière gaz de 1,1 MW et groupe froid à l'ammoniac sur tour aéroréfrigérante de 0.8 MW.

3.10.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 8 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chaleur et de froid de deux procédés industriels fonctionnant en 3 x 8h (dont 1 quart nocturne pour le nettoyage journalier en parallèle d'une production partielle (nettoyage par atelier) (puissance de chauffage de 1,1 MW, puissance de refroidissement de 0.8 MW), nécessitant une relève jusqu'à 55°C et une eau glacée à -11°C, pendant une année »

La consommation annuelle est de : 3,9 GWh de chaleur et 5,7 GWh de froid.

3.10.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.10.2.1 Description du système S8-R

L'unité principale de production de chaleur et de froid pour ce système est une thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante.

Le système S8-R est ainsi composé de :

- Tour aéroréfrigérante
- Thermo-frigo-pompe de 0,8 MW froid et 1,1 MW chaud ;

- Utilisation d'ammoniac comme fluide frigorigène ;
- Ballons ECS d'une capacité totale de 200 m³.

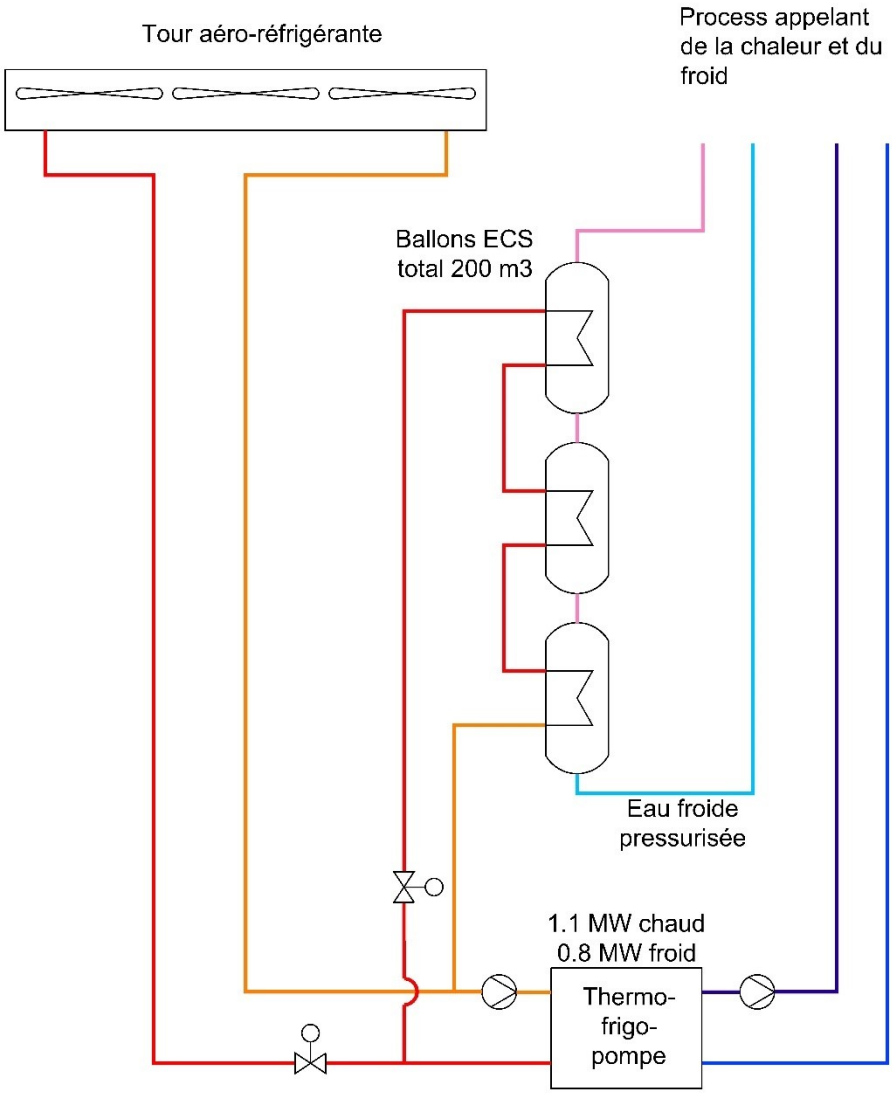


Figure 3-42 : Système S8-R : Schéma type

3.10.2.2 Description du système S8-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9) et pour la production de froid l'unité principale est un groupe froid utilisant de l'ammoniac.

Cette solution se compose de :

- Alimentation en gaz et cheminée ;
- Chaudière gaz de 1,1 MW ;
- Tours aéroréfrigérantes
- Groupe froid de 0,8 MW froid ;

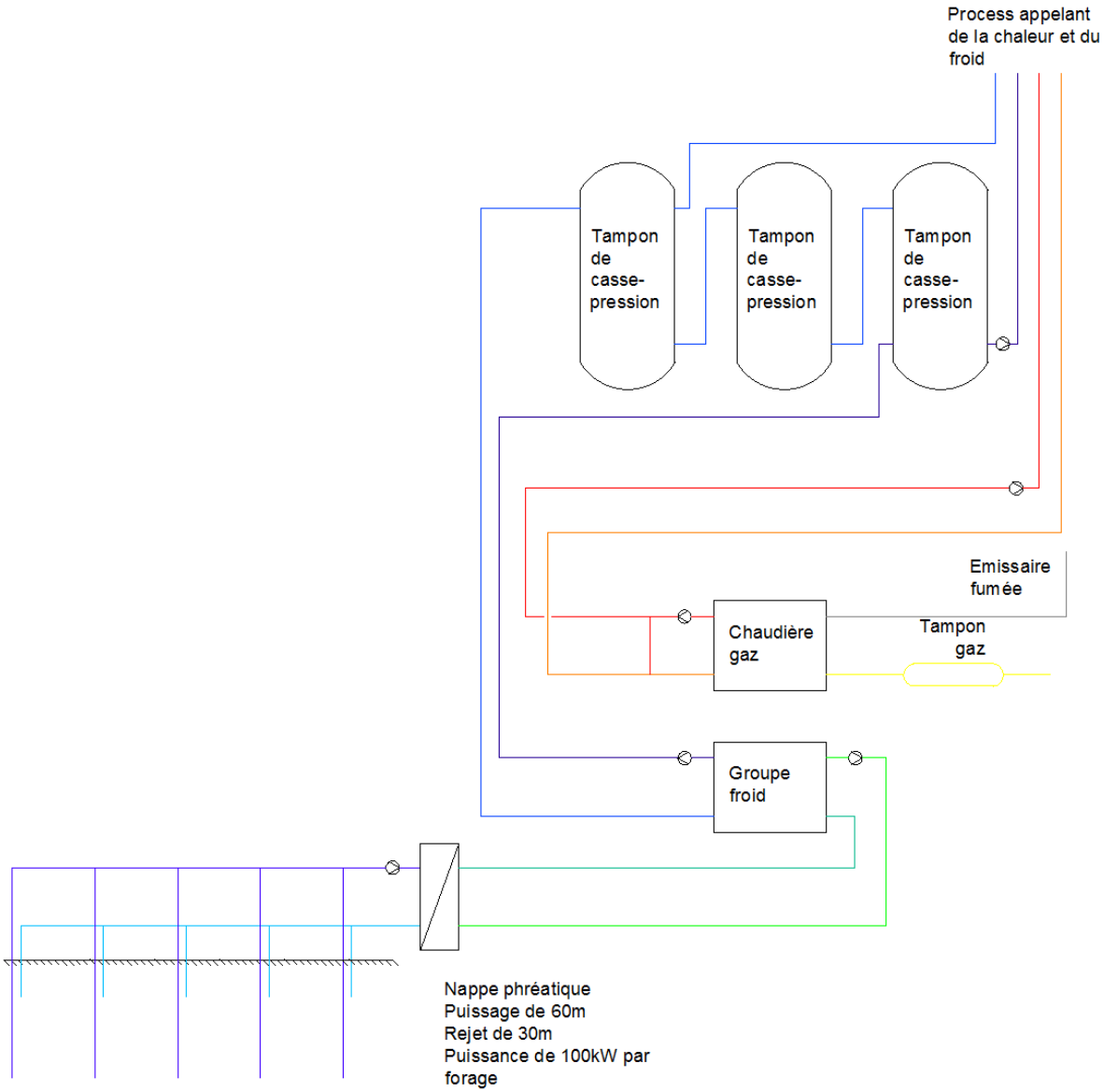


Figure 3-43 : Système S8-Cref : Schéma type

3.11 Cas d'étude 9

Le cas d'étude 9 consiste à répondre aux besoins de chaleur d'un industriel. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance chaude de 2,0 MW ;
- Besoin en chaleur avec un régime de 80/50°C.

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système S9-R : Centrale solaire thermique avec capteurs plans grande surface ;
- Système S9-Cref : Chaudière gaz.

Le cas d'étude correspond à un procédé de pasteurisation, de préchauffage d'un tunnel de cuisson ou de séchage.

3.11.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 9 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chaleur d'un procédé industriel fonctionnant en 2 x 8h, nécessitant de chauffer de l'eau à 80°C (puissance de chauffage de 2 MW), pendant une année »

La consommation annuelle est de : 10 GWh de chaleur.

3.11.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.11.2.1 Description du système S9-R

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est un champ de capteur solaire thermique plan.

Le système S9-R est ainsi composé de :

- Champs de capteurs solaires thermiques plan double vitrage ;
  - 576 capteurs d'une surface brute de 9190 m²
  - Avec cette surface la production et ce volume de stockage associé, l'installation permet de couvrir 53 % du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 36 %.
- Ballon tampon couvert à l'azote de 3000m³ ;
- Chaudière gaz en secours et appoint.

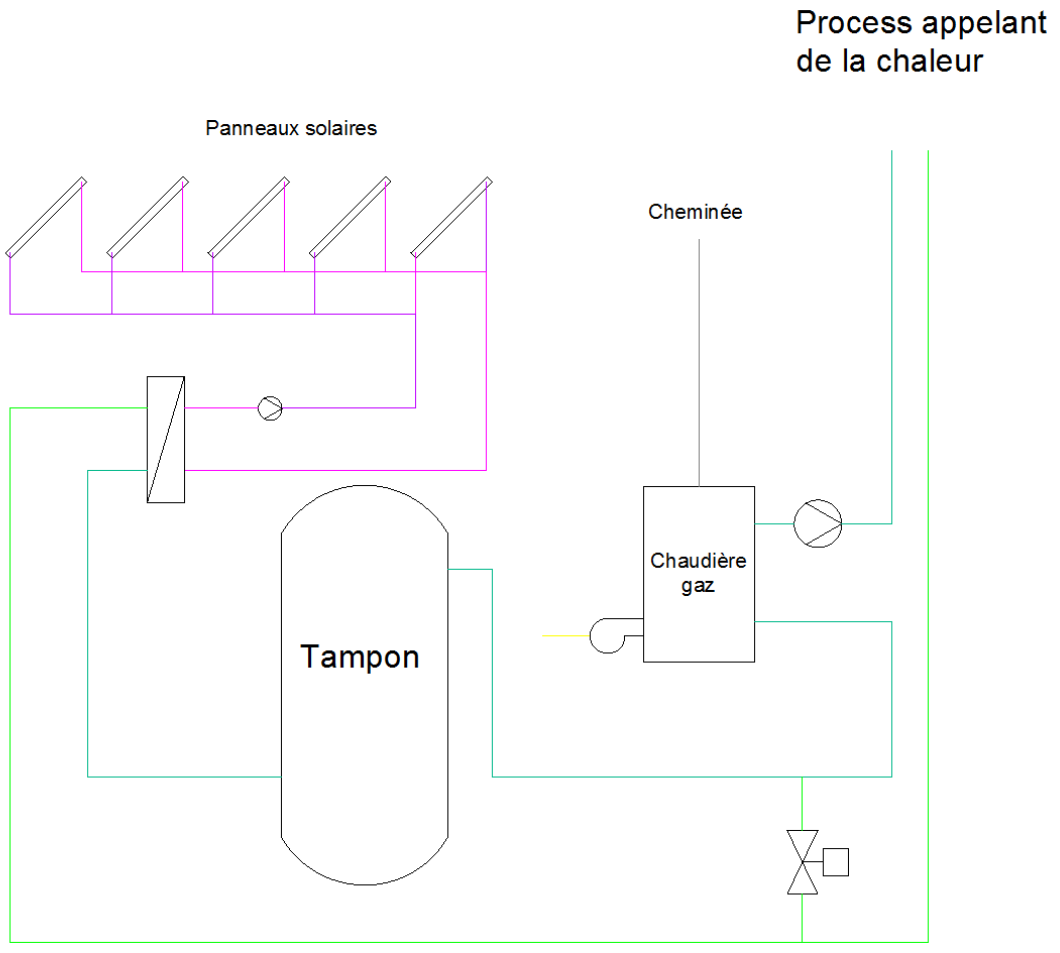


Figure 3-44 : Système S9-R : Schéma type

3.11.2.2 Description du système S9-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz.

Le système S9-Cref est ainsi composé de :

- Alimentation en gaz et cheminée ;
- Une chaudière gaz de 2 MW.

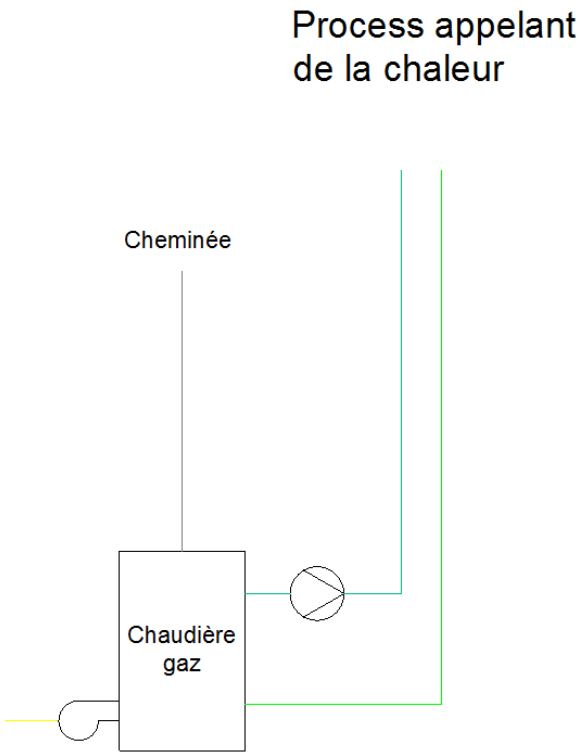


Figure 3-45 : Système S9-Cref : Schéma type

3.12 Cas d'étude 10

Le cas d'étude 10 consiste à répondre aux besoins de chaleur d'un industriel. Il est défini de la manière suivante :

- Puissance chaude de 1 MW ;
- Besoin en chaleur avec un régime de 100/110°C.

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système S10-R : Centrale solaire thermique avec capteurs sous vide ;
- Système S10-Cref : Chaudière gaz.

Le cas d'étude correspond à un procédé de pasteurisation (66 – 88°C), de réchauffage d'un liquide ou gaz ou de production de vapeur.

Les panneaux solaires thermiques à capteur sous vide sont très chers et peuvent se trouver confrontés à un problème de garantie du vide, en particulier pour les panneaux produits en Chine. En comparaison avec les panneaux du cas d'étude 9, les cibles sont sensiblement les mêmes, on peut également ajouter les papeteries, la fabrication textile et les cimenteries, car il est possible d'atteindre un régime de température plus élevé avec ce type de panneau.

3.12.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 10 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chaleur d'un procédé industriel fonctionnant en 2 x 8h, nécessitant de préchauffer de l'eau ou de la vapeur à 100 °C (puissance de chauffage de 1 MW), pendant une année »

La consommation annuelle est de : 5,0 GWh de chaleur.

3.12.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.12.2.1 Description du système S10-R

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est un champ de capteurs solaires thermiques sous-vide.

Le système 10-R est ainsi composé de :

- Champs de capteurs solaires thermiques tube sous vide ;
  - 460 capteurs d'une surface brute de 2438 m^2
  - Avec cette surface la production et ce volume de stockage associé, l'installation permet de couvrir 12 % du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 9 %.
- Ballon tampon pressurisé de 50 m^3 ;
- Chaudière gaz (1,0 MW) en secours et appoint.

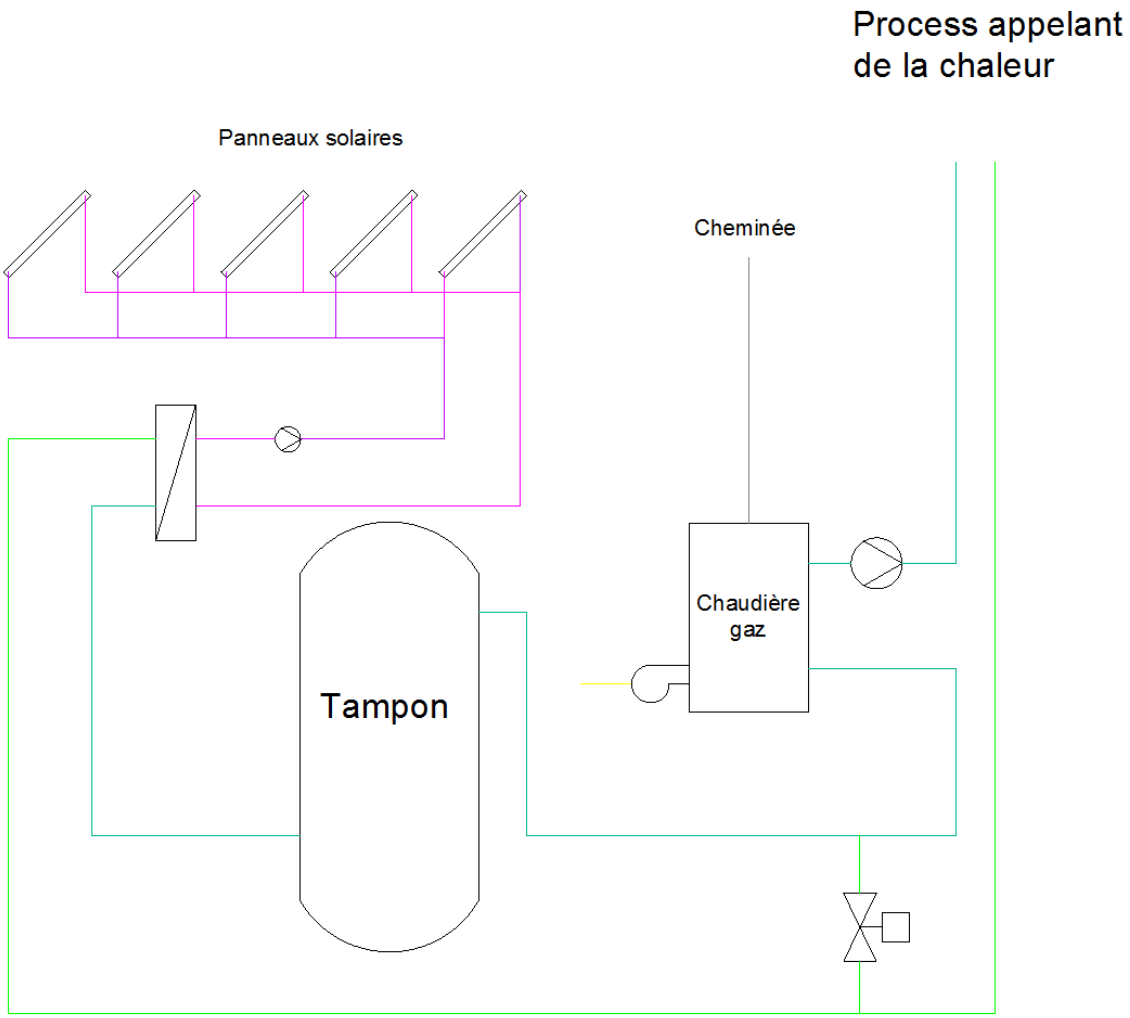


Figure 3-46 : Système S10-R : Schéma type

3.12.2.2 Description du système S10-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz.

Le système S10-Cref est ainsi composé de :

- Alimentation en gaz et cheminée ;
- Une chaudière gaz de 1 MW.

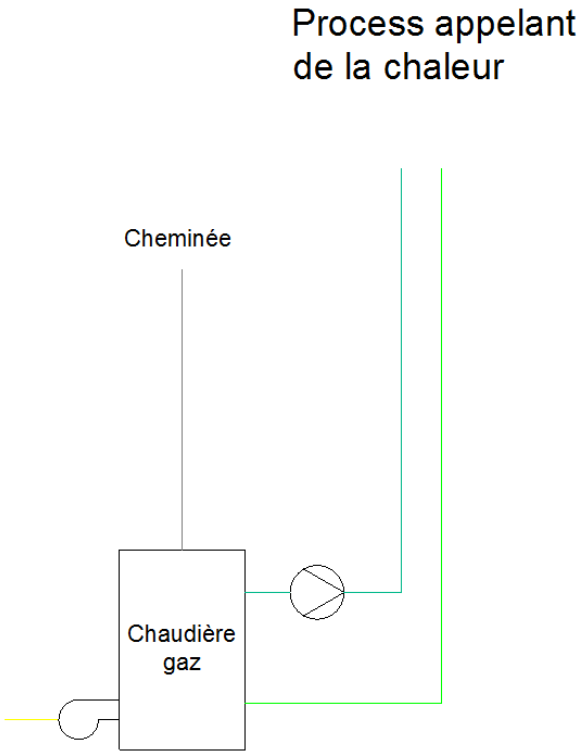


Figure 3-47 : Système S10-Cref : Schéma type

3.13 Cas d'étude 11

Le cas d'étude 11 consiste à répondre aux besoins de chauffage des clients du réseau de chaleur existant Argéo en 2019. Il est défini de la manière suivante :

- Réseau de chaleur urbain ;
- Puissance chaude au consommateur de 45 MW **souscrit** ;
    - L'essentiel des consommateurs sont des logements collectifs, des équipements collectifs (gymnases, écoles, mairies, crèches) et des entreprises ;
    - Le réseau de chaleur urbaine est étalé sur la commune d'Arcueil et de Gentilly ;
- Régime de température du réseau secondaire de chaque sous-station (bâtiment) : variable avec un retour variant de 40°C à 50°C et un départ allant jusqu'à 75°C ;
    - Dans le cas des systèmes décentralisés, nous avons supposé que ce même régime de température était utilisé.
    - Ce régime d'eau est généralement utilisé pour alimenter des radiateurs et produire de l'eau chaude sanitaire. Il a été estimé à partir des températures de départ et de retour au niveau de la chaufferie tout au long de l'année ;
- Régime de température du réseau de chaleur : de 45°C à 55°C pour le retour et de 53°C à 80°C pour le départ ;
    - Il a donc été choisi de considérer le régime d'eau sur tout le réseau car la variation de température due aux pertes thermiques du réseau est inférieure à 1°C.
- Raccordement considéré de 130 sous-stations de 345 kW chacune ;

Les systèmes comparés sont les suivants :

- Système renouvelable centralisé (S11-RC) : Réseau de chaleur sur aquifère profond (Dogger) avec PAC en épuisement et relève de température ;
- Système de référence centralisé (S11-Cref) : Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- Système de référence décentralisé (S11-Dref) : Chaudières gaz par bâtiment ;

Ce type de système correspond à la mise en place d'un réseau de chaleur urbain dans une zone urbaine existante dense. Pour ce besoin, aucun système de référence décentralisé à base de pompe à chaleur n'a été considéré. Les raisons sont les suivantes :

- Les PAC air/eau ne sont pas adaptées pour atteindre un régime de température 75°C / 50°C, pour deux raisons principales :
    - Pour ces équipements, la puissance chaude diminue fortement lorsque l'écart entre la température de la source chaude et celle de la source froide augmente. Par exemple, une PAC dont le fabricant indique qu'elle peut délivrer une puissance de 10 kW avec des températures de 7°C et 35°C ne pourra produire que 6-8 kW de chaleur avec des températures de -7°C et 60°C. Pour répondre à ce besoin avec des PAC air/eau par bâtiment et s'assurant que le système est capable de produire dans toutes les conditions climatiques, il faudrait surdimensionner les équipements.
    - En plus de la baisse de la puissance chaude, le COP du système s'effondre également en cas de différence de température trop importante. Pour atteindre 75°C, il est possible que la consommation électrique soit telle que les coûts de la consommation électrique (hors coûts d'investissement), soient supérieurs aux coûts de la consommation équivalente de gaz.
- Les systèmes de PAC sur aquifère profond ne sont pas adaptés pour de faibles puissances. Les coûts d'investissement et de fonctionnement ne sont pas compatibles avec une utilisation en décentralisé.

Pour ces raisons, aucune comparaison avec des systèmes décentralisés basés sur des pompes à chaleur n'est réalisée dans ce cas d'étude.

3.13.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour le cas d'étude 11 est la suivante :

« Couvrir les besoins de chauffage de 130 sous-stations (puissance totale souscrite de 45 MW), dans des conditions climatiques moyennes représentatives une année douce en région parisienne (2019), pendant une année, en régime 75/50°C dans le circuit de chauffage secondaire, avec une disponibilité minimum de 95% »

La consommation annuelle en chaleur est de 64 GWh.

3.13.2 Description des systèmes comparés dans le cas d'étude

3.13.2.1 Description du système renouvelable centralisé S11-RC

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une pompe à chaleur sur aquifère profond (Dogger) (§ 3.2.1.2).

Le système S11-RC est ainsi composé de :

- Forage dans la nappe (forage de prélèvement et forage de réinjection) ;
    - Environ 2915 m² d'emprise au sol (dont 900 m^2 de bâtiment) ;
- Pompes à chaleur 18 MW (1 PAC de 9,5 MW et une de 8,5 MW) ;
    - Avec cette puissance (72% de la puissance totale sur la chaufferie neuve) la production permet de couvrir 94% du besoin en chaleur de la chaufferie neuve et 83% du besoin en chaleur du réseau et à une charge moyenne annuelle de 40% sur la chaufferie neuve.

- Secours et appoint chaudières gaz
    - 12 MW de chaudières neuves (2 chaudières)
    - 24 MW de chaudières existantes (4 chaudières)
    - Dont 27 MW d'appoint ;
- Longueur du réseau de chaleur : 18500 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
    - 130 stations de 345 kW en moyenne.

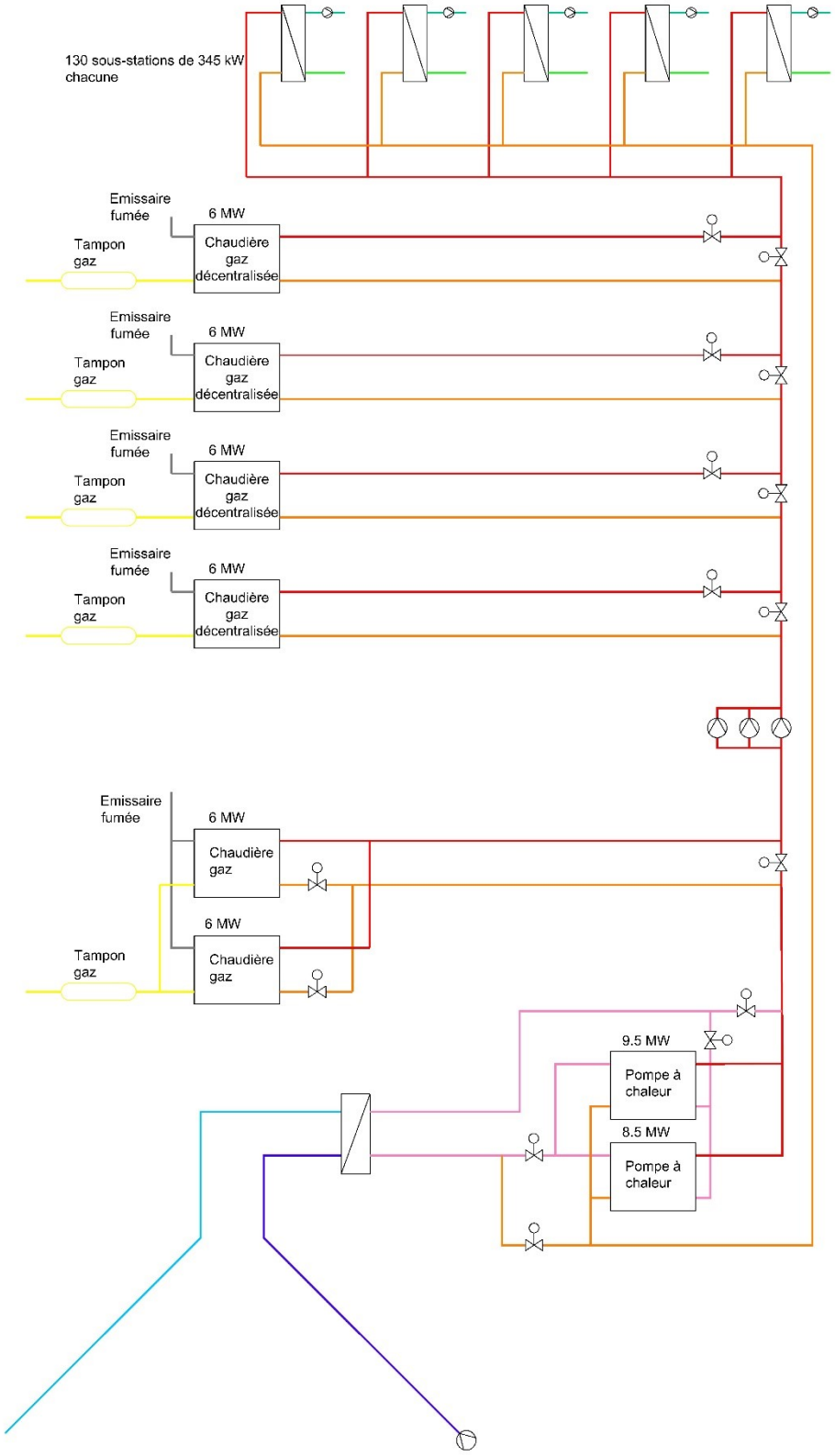


Figure 3-48 : Système S11-RC : Schéma descriptif

3.13.2.2 Description du système de référence centralisé S11-Cref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Le système S11-Cref est ainsi composé de :

- Chaudières gaz
    - 30 MW de chaudières neuves (5 chaudières)
    - 24 MW de chaudières existantes (4 chaudières)
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production par chaudière gaz permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 31%.
- Longueur du réseau de chaleur : 18500 mètres linéaires ;
- Clients du réseau de chaleur ;
    - 130 stations de 345 kW en moyenne.

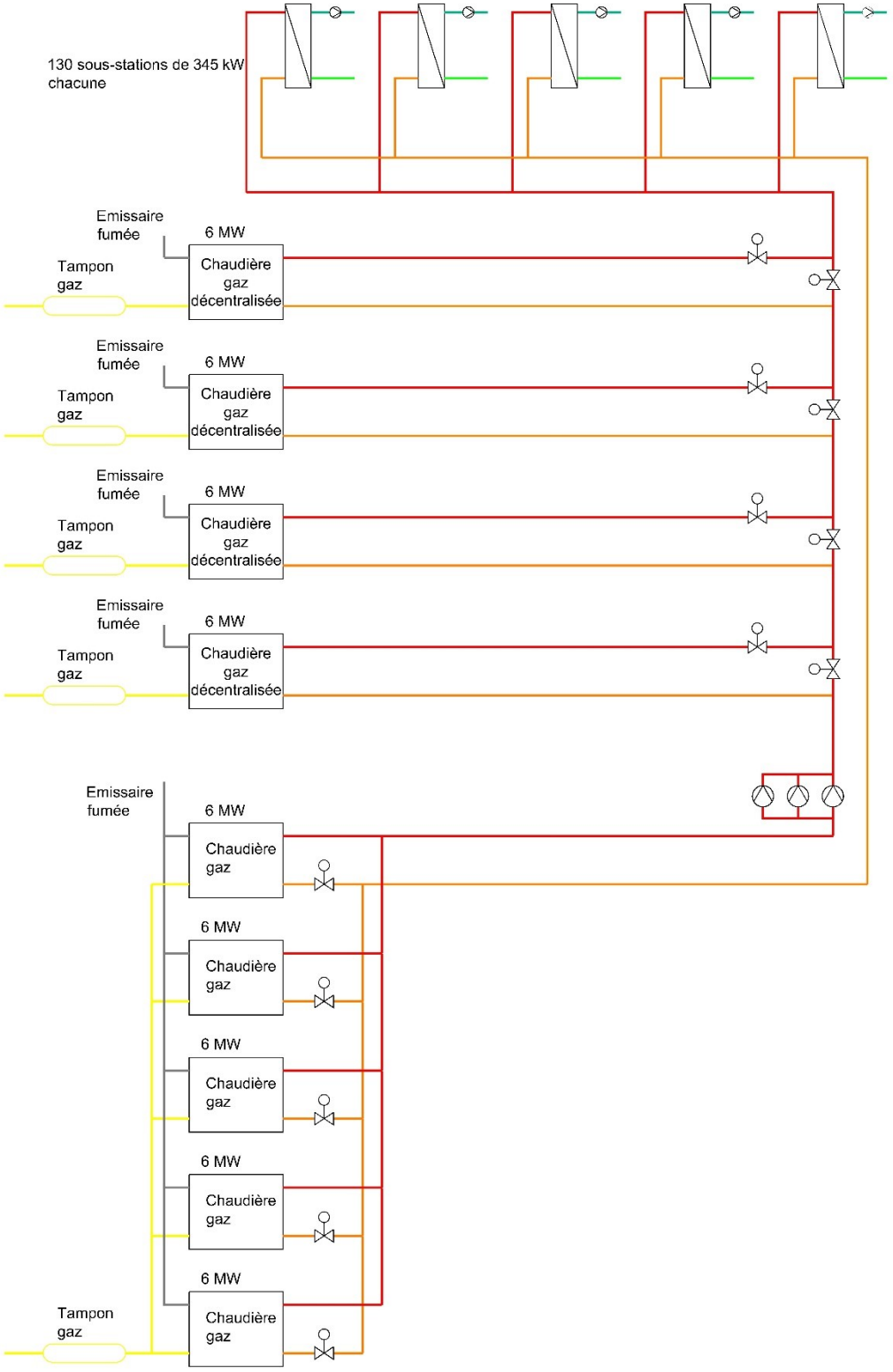


Figure 3-49 : Système S11-Cref : Schéma descriptif

3.13.2.3 Description du système de référence décentralisé S11-Dref

L'unité principale de production de chaleur pour ce système est une chaudière gaz (§ 3.2.1.9).

Chacun des 130 systèmes S11-Dref est ainsi composé de :

- 1 chaudière gaz de 345 kW ;
    - Avec cette puissance (100% de la puissance totale) la production par chaudière gaz permet de couvrir 100% du besoin en chaleur et à une charge moyenne annuelle de 31%.

Ce système est reproduit 130 fois.

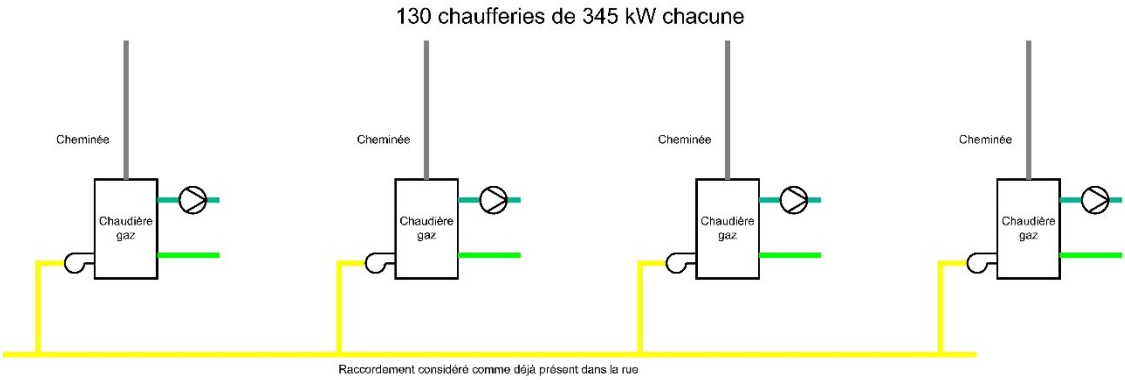


Figure 3-50 : Système S11-Dref : Schéma descriptif

4 Inventaire du cycle de vie

4.1 Eléments communs à tous les cas d'étude

4.1.1 Méthode de collecte des données

Dans un premier temps, une revue bibliographique a été réalisée sur les études ACV des systèmes de chaleur et de froid. Elle a permis de mettre en avant les paramètres ayant une contribution importante sur les résultats finaux tels que la consommation énergétique des différents systèmes durant la phase d'utilisation, le mix électrique ou la quantité de réfrigérant utilisé. Néanmoins, cette étude de littérature nous a permis de constater le manque d'études menées sur les systèmes industriels et/ou de grande puissance : seuls les systèmes décentralisés ont fait l'objet d'études ACV.

Dans un second temps, une collecte de données primaires auprès de fabricants a été effectuée avec une attention particulière sur les étapes/éléments/matériaux identifiés comme les plus contributeurs par l'étape précédente. Si la collecte se montre infructueuse, ces dits paramètres sont estimés sur des revues techniques, par bibliographie ou par dires d'experts, avec, au mieux, une validation de ces hypothèses par les fournisseurs. Ceci relève de la précision des données qui sera évaluée pour chaque scénario de chaque cas d'étude.

Enfin, les différents systèmes ont été modélisés sur le logiciel SimaPro 9.0 [13] associé à la base de données ecoinvent v3.5 [9]. Celle-ci permet de disposer de données génériques telles que le mix électrique français annuel ou la production d'acier ou de cuivre. Ces données peuvent également être adaptées selon les informations obtenues auprès des fournisseurs afin d'obtenir des données spécifiques à nos cas d'études.

Les efforts de collecte ont été concentrés sur les éléments du modèle qui contribuaient le plus aux impacts calculés (présentés au § 5). En particulier, suite aux premiers résultats, nous avons décidé d'améliorer le modèle utilisé pour modéliser les consommations d'électricité des systèmes de production de chaleur et de froid pour les réseaux urbains, dont les appels de puissance ne sont pas constants dans l'année.

4.1.2 Description du modèle d'inventaire du cycle de vie

4.1.2.1 Hypothèses communes à tous les cas d'étude

Divers transports ont été pris en compte dans le cadre de cette étude et homogénéisés pour simplification de la modélisation. Les hypothèses issues de l'expertise ACV d'ENGIE dans les systèmes énergétiques sont indiquées ci-dessous :

Tableau 4-1 : Description des hypothèses générales relatives au transport

Module ou étape	Mode de transport	Distance (km)
Acheminement de pièces entières	Train + Camion EURO 6	3000 + 100
Acheminement de réseaux	Bateau + Camion EURO 6	10000 + 100
Acheminement autre	Camion EURO 6	100
Fin de Vie	Camion EURO 6	100

Concernant les pièces entières, il a été considéré, après consultations de plusieurs fiches INIES, qu'elles étaient acheminées dans un packaging équivalent à 5% de leur masse. Ce n'est pas le cas des réseaux qui sont acheminés sans emballage (hypothèse CRIGEN).

4.1.2.2 Cas des mix électriques

Les scénarios urbains, et certains scénarios industriels, présentent des équipements de chauffage qui fonctionnent de manière saisonnière (par définition). Le mix électrique annuel disponible dans ecoinvent v3.5 [9]. ne représente alors pas la réalité du mix de production appelé pendant la saison de chauffe.

Ainsi, pour les équipements et scénarios qui le justifiaient, un mix dynamique a été adopté.

Ces équipements sont :

- Pompe à Chaleur – S1-RC1
- Pompe à Chaleur – S1-RC2
- Pompe à Chaleur – S1-Drèf 2
- ThermoFrigoPompe – S2R
- Groupe Froid (appoint) – S2R
- Groupe Froid – S2Cref
- Groupe Froid – S2Dref1
- ThermoFrigoPompe – S2Drèf2
- Groupe Froid absorption – S3R
- Groupe Froid (appoint) – S3R
- Groupe Froid – S3Crèf
- Groupe Froid – S3Drèf1
- ThermofrigoPompe Ammoniac -S8R
- Groupe froid Absorption Ammoniac -S8C
- Pompe à Chaleur – S11-RC
- Pompe d'exhaure – S11-RC

Pour ces derniers équipements, la demande horaire a été compilée à la production horaire sur l'année de référence du scénario par l'équipe Centre Efficacité Energétique des Systèmes des Mines de Paris selon la méthode développée dans [20].

Pour tous les autres équipements, dont le fonctionnement n'est pas particulièrement marqué par saison, une approximation par le mix annuel de l'année de référence a été réalisée, mix reconstitué selon la même méthode que précédemment.

Le mix électrique annuel 2017 de consommation est donc présenté ci-dessous. C'est un mix moyen annuel donné par l'outil des Mines avec une consommation constante à chaque heure de l'année.

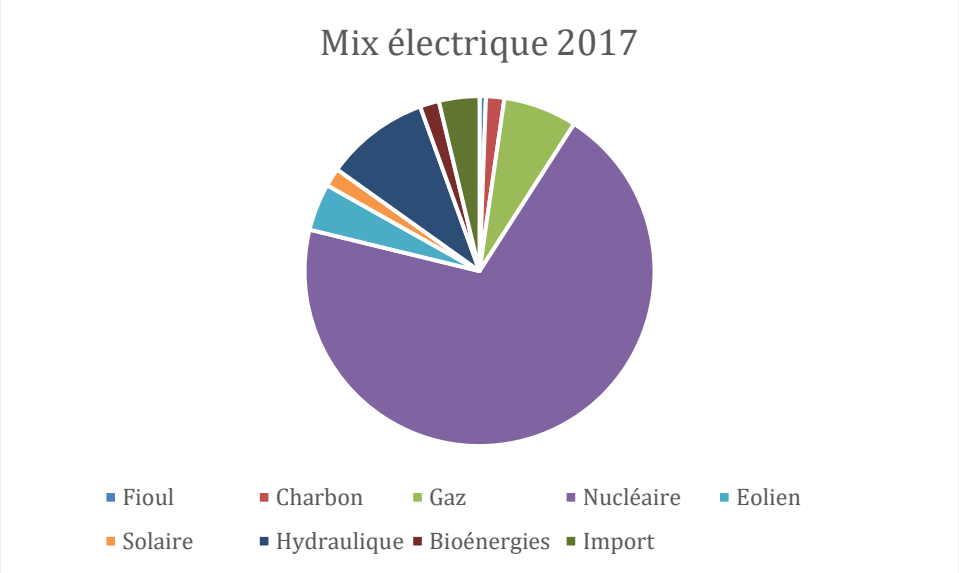


Figure 4-1 : Mix électrique 2017 - répartition par filières

Dans le cadre du scénario 11, qui pour rappel se base sur un cas réel avec les données de 2019, ce même travail a été effectué par le centre énergétique des Mines de Paris à l'aide du même outil et en utilisant la même méthodologie. Le mix électrique annuel de consommation de l'année 2019 est présenté ci-dessous :

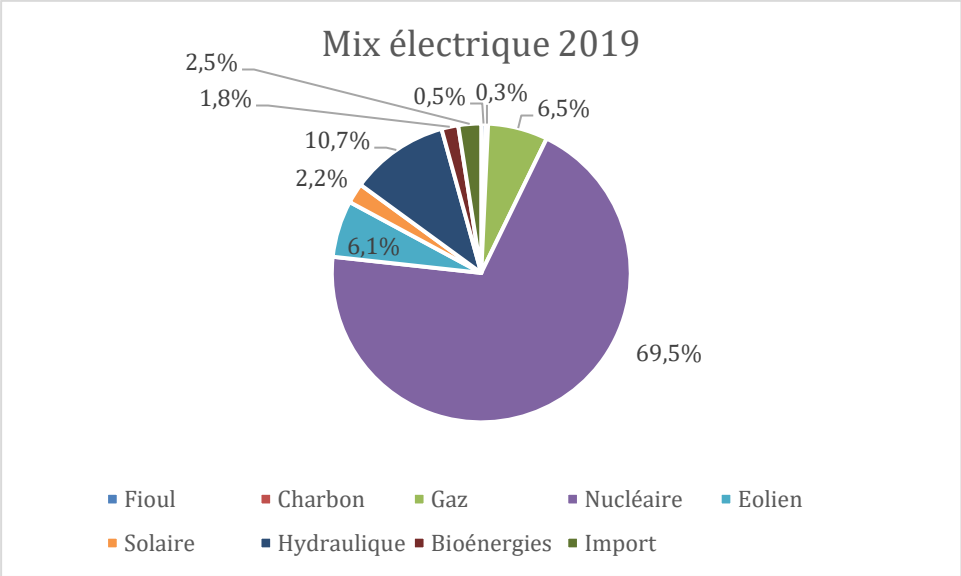
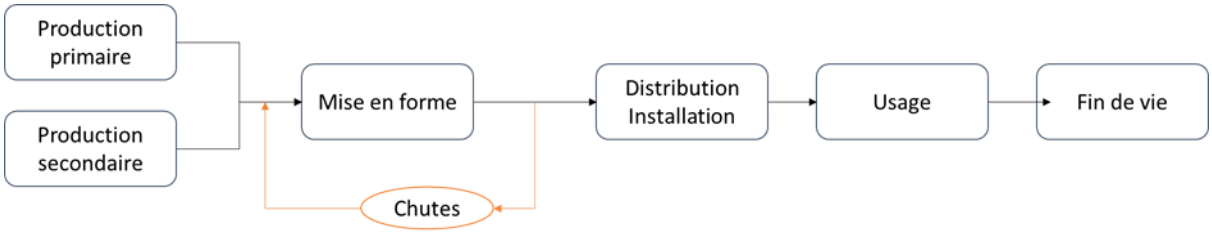


Figure 4-2 : Mix électrique français 2019

4.1.2.3 Modélisation de la production et de la fin de vie des matériaux selon la formule CFF de PEF

Lors de leur mise en forme, les matériaux subissent des procédés créant des chutes de matériau, qui, dans cette étude, sont supposées être utilisées directement en boucle rapide dans l'usine pour créer la pièce suivante. C'est notamment le cas des métaux, comme illustré ci-dessous :



Afin d'être cohérent dans la méthodologie décrite au § 3.2.6, ces chutes de matériaux doivent être également modélisées selon PEF. Il s'agit d'adapter les procédés de formage des matériaux ecoinvent afin de prendre en compte :

- L'appel de matière première supplémentaire (vierge et recyclée) pour compenser les pertes dans le process de formage
- Le traitement de fin de vie des chutes de production (supposées 100% recyclées donc)

Cette partie est illustrée avec l'exemple du cuivre ci-dessous : le procédé de formage de cuivre issu d'ecoinvent prend en compte un taux de chutes de 22.7% en incorporant en intrant du procédé 0.227 kg de cuivre (market GLO) pour 1 kg de cuivré formé. Cet intrant de 0.227 kg supplémentaire a une fin de vie particulière puisqu'il est supposé être entièrement recyclé (R2=1) pour être réincorporé dans le procédé de formage.

Un procédé « scrap » est donc crée avec un même taux de recyclé en entrée mais un taux de recyclage égal à 1 en sortie afin de simuler la boucle des scraps. Le procédé initialement utilisé dans le procédé de formage d'ecoinvent est retranché et le procédé scrap est ajouté à la place comme illustré ci-dessous :

Inputs from technosphere: materials/fuels	Amount	Unit	Distribution
Metal working, average for copper product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S	1	kg	Undefined
CFF copper scrap	0.227	kg	Undefined
Copper {GLO}| market for | Cut-off, S	-0.227	kg	Undefined

Figure 4-3 : Illustration de l'adaptation des procédés de formage à la modélisation CFF

4.1.2.4 Présentation des mutualisations entre cas d'étude

Comme décrits précédemment, les cas d'étude sont composés de systèmes. Après avoir listé l'ensemble de ces systèmes, cela amène à un total de 69 éléments à modéliser. Afin de simplifier la modélisation et ce de manière pertinente, certains systèmes ont été regroupés entre eux et modélisés de la même façon, au prorata d'une de leurs caractéristiques. Par exemple, les chaudières de gaz de puissance inférieure à 250 kW sont regroupées en « chaudière gaz de faible puissance » et sont paramétrées en fonction de leur masse (trouvée dans les documentations techniques) suite à la composition matière d'une chaudière de ce rang de puissance. On suppose que ces chaudières sont faites à partir des mêmes matériaux et que la proportion de chaque matériau est identique.

Les proratas sont effectués en fonction de la masse pour la plupart des systèmes, à l'exception des panneaux solaires qui sont regroupés par surface.

Les regroupements proposés sont présentés dans le Tableau 4-2 :

Tableau 4-2 : Mutualisation des modèles d'inventaire de cycle de vie pour différents cas d'étude

Equipement présent dans l'inventaire	Présent dans les scénarios	Modélisé à partir d'un flux élémentaire et source de sa modélisation	Et multiplié par la quantité associée	Source de la quantité associée
Ballon tampon de 5000 L	S1-RC1, S1-RC2	1 kg de Ballon tampon issu d'un ballon tampon de 363 kg pour 933 L [21]	2 155 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]
Ballon tampon de 2000L	S2-RC, S3-RC, S3-Créf, S5-R, S5-Cref		862 kg	
Ballon tampon de 1000 L	S6R		431 kg	
Ballon tampon de 3000 m3	S9-R, S9-Cref, S10-R		1 293 t	
Ballon tampon de 120 m3	S4-RC		51 732 kg	
Ballon tampon de 200 m3	S8-R		21520 kg	
Ballon tampon de 4000 L	S4-RC		1 768 kg	
Capteur plan petite surface de2,8m²	S4-RC	1 m² de Capteur issu d'un capteur de 2,16 m² [22]	2,8	Modélisation TRNSYS
Capteur plan petite surface de 2,16 m²	S4-Dref2		2,16	Masse extrapolée de la fiche PEP [22]
Capteur plan grande surface de 16m²	S9-R, S4-RC	1 m² de Capteur issu d'un capteur de 16 m² [23]	16	Masse extrapolée de [23]
Chaudière de 2,6 MW	S1-RC1,S1-RC2	1 kg de Chaudière issu d'une chaudière de 1 MW pesant 2300 kg [24]	4,3 t	Fiche technique Viessmann [24] (page 4, taille, modèle 6 bars)
Chaudière de 1,7 MW	S1-Cref, S7-Créf		3,2 t	Fiche technique de Viessmann [24] (page 4, modèle 5, 6 bars)

Equipement présent dans l'inventaire	Présent dans les scénarios	Modélisé à partir d'un flux élémentaire et source de sa modélisation	Et multiplié par la quantité associée	Source de la quantité associée
Chaudière de 2 MW	S9-R, S10-R, S9-Cref		3 700 kg	Fiche technique Viessmann [24]
Chaudière de 1,1MW	S8-Cref		4 482 kg	Fiche technique Babcock [25] (modèle HW3P 1160)
Chaudière de 1 MW	S10-R, S-10 Créf		2 300 kg	Fiche technique Viessmann [24]
Chaudière de 1,7 MW	S1-Créf		2 600 kg	Fiche technique Viessmann [24]
Chaudière de 1,4 MW	S4-Créf, S9-Cref		2 600 kg	Chaudière Viessman Vitomax de taille 4 [24]
Chaudière de 250 kW	S6 Créf		364 kg	Fiche technique de De Dietrich [26]
Chaudière de 350 kW	S2-RC		800 kg	Fiche technique De Dietrich [26], page 3 modèle 300 ou 350
Chaudière de 6 MW	S11-RC, S11-Cref		8346 kg	Extrapolation basée sur la fiche technique Viesmann Vitomax 200 LW [27], page 5 taille 6
Chaudière de 0,6 MW	S4-RC		1 100 kg	Chaudière de 608 kW sortie de la modélisation TRNSYS approximée par les règles de masse / puissance [28]
Chaudière de 10 kW	S4-RC	1 kg de Chaudière issu d'une chaudière de 102 kW pesant 187,1 kg [28]	13 kg	Basé sur la fiche PEP d'une chaudière [28]
Chaudière de 100 kW	S1-Dréf 1		187 kg	
Chaudière de 50 kW	S2-Dréf 1		70 kg	
Chaudière de 345 kW	S11-Dréf		687 kg	
Chaudière de 130 kW	S4-Dréf 1, S4-Dref2		235 kg	
Groupe froid de 0,5 MW	S3-Cref	1 kg de Groupe froid issu d'un groupe froid de 0,5 MW pesant 3900 kg [29]	3 900 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Carrier [29] ,page 9, modèle 146
Groupe froid de 0,8 MW	S8-Cref		4 450 kg	Données récoltées par Tractebel auprès d'un expert AXIMA
Groupe froid de 2 MW	S5-Cref		11 000 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Carrier [30], page 6 modèle 6060
Groupe froid de 350 kW	S2-RC, S2Cref		3 000 kg	Fiche technique Carrier [29] , page 9, modèle 106
Pompe à chaleur aérothermie de 100 kW	S1-Dref2, S3-Dref	1 kg de Pompe à chaleur aérothermie issu d'une pompe à chaleur de 100 kW et pesant 1800 kg [31]	1 800 kg	Hypothèses Tractebel basées sur la documentation de Viessmann [31] (page 4)
Pompe à chaleur de 500 kW	S3-RC	1 kg de Pompe à chaleur issu d'une pompe à chaleur de 850 kW pesant 5000 kg [29]	3 900 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Carrier [29], page 9, modèle 146

Equipement présent dans l'inventaire	Présent dans les scénarios	Modélisé à partir d'un flux élémentaire et source de sa modélisation	Et multiplié par la quantité associée	Source de la quantité associée
Pompe à chaleur de 0,85 MW	S1-RC1, S1-RC2		5 t	Fiche technique Carrier [29] (page 10, modèle 261)
Pompes de 250 m3/h	S1-RC1; S1-RC2; S1-Cref	1 kg de pompe issu d'une pompe de 60 m3/h pesant 200 kg [32]	700	Fiche technique Grundfos [33]
Pompes de 150 m3/h	S8-R; S8-Cref		520	Fiche technique Grundfos [34]
Pompes de 100 m3/h	S2-RC; S2-Cref; S3-RC; S3-Cref; S5-R		300	Extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]
Pompes de 90m3/h	S10-R; S10-Cref		250	Basé sur la fiche technique Grundfoss [32]
Pompes de 60 m3/h	S4-RC; S4-Cref; S9-R; S9-Cref		200	Fiche technique Grundfoss [32]
Pompes de 10 m3/h	S6-R; S6-Cref		30	Fiche technique Grundfos [35]
1m de Câbles électriques	S1-RC1; S1-RC2; S1-Cref; S2-RC; S2-Cref; S3-RC; S3-Cref; S4-RC; S4-Cref; S5-R; S5-Cref, S11-RC, S11-Créf	1 kg de cuivre	0,448	Tractebel
Transformateur	S1-RC1; S1-RC2; S4-RC; S5-Cref	1 kg de transformateur issu d'un transformateur de 890 kg [36]	890	Extrapolation à partir de la fiche technique de Cahors [36]
	S11-RC		3650	
	S2-RC; S2-Cref		720	
	S3-RC; S3-Cref; S7-R		2900	
	S1-Dref2; S2-Dref2; S3-Dref; S4-Dref2		17	
Electronique pour la régulation	S1-RC1; S1-RC2; S1-Cref; S2-RC; S2-Cref; S3-RC; S3-Cref; S4-RC; S4-Cref; S5-R; S5-Cref; S7-R; S8-R; S8-Cref; S9-R; S10-R, S11-RC, S11-Créf	1 PC pour la régulation (ecoinvent)	3	Tractebel
	S2-Dref1; S2-Dref2; S6-R; S9-Cref; S10-Cref		1	
	S1-Dref1; S1-Dref2; S4-Dref1; S4-Dref2; S6-Cref; S7-Cref; S11-Dréf		0,5	
2500 m² de génie civil	S1 RC1; S1 RC2; S2-RC; S2-Cref; S4-RC, S11-RC;S11-Créf	1 kg de génie civil (Tractebel)	1000	Tractebel
400m² de génie civil	S1-Cref; S4-Cref		500	

Equipement présent dans l'inventaire	Présent dans les scénarios	Modélisé à partir d'un flux élémentaire et source de sa modélisation	Et multiplié par la quantité associée	Source de la quantité associée
Cheminée	S1 RC1; S1 RC2; S1-Cref; S2-RC; S2-Cref; S4-RC; S4-Cref; S9-R; S9-Cref; S10-R; S10-Cref;S11-RC;S11-Créf	1 kg de cheminée (Tractebel)	185000	Tractebel
Pont roulant	S1 RC1; S1 RC2; S1-Cref; S2-RC; S2-Cref; S4-RC; S4-Cref; S5-R; S5-Cref; S7-R; S9-R; S9-Cref; S10-R; S10-Cref;S11-RC;S11-Créf	1 kg de pont roulant (Tractebel)	13270	Tractebel
Réseau de chaleur	S1 RC1; S1-RC2; S1-Cref	1 km de réseau de chaleur (Tractebel)	4,4	Tractebel
	S11-RC;S11-Créf		18,5	
	S2-RC.; S2-Cref		0,8	
	S4-RC; S4-Cref		2	
Réseau de froid	S2-RC.; S2-Cref	1 km de réseau de froid (Tractebel)	0,9	
	S3-RC; S3-Cref		1,1	

4.1.3 Procédure de validation des données

4.1.3.1 Validation des données primaires collectées

Les données dites primaires, donc de premier rang, sont au mieux collectées auprès de fournisseurs ou estimées à partir de sources bibliographiques. Afin de contrôler la cohérence de ces données, des bilans entrée/sortie et des contrôles des unités sont effectuées.

Dans la mesure du possible, des comparaisons sont effectuées des comparaisons avec des données disponibles (via ecoinvent ou des fiches INIES de systèmes de même famille) pour d'autres systèmes comparables afin de valider les données primaires.

4.1.3.2 Validation des données génériques

Les données génériques sont validées par itération : elles sont incorporées dans les modèles ACV et affinées au fur et à mesure de l'analyse de contribution en sortie. Elles sont révisées si leur qualité n'est pas suffisante, notamment au regard de leur contribution.

4.1.4 Traitement des données manquantes

Pour les données manquantes, il a fallu contrer le manque d'informations à l'aide d'approximations issues de la bibliographie.

C'est le cas de la modélisation du réfrigérant R1234ze pour lequel il n'existe pas de procédé ecoinvent.

Conformément à la donnée environnementale conventionnelle (à utiliser dans le cadre de l'application du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs), la production de ce réfrigérant a été modélisée en extrapolant celle du R134a (disponible sur ecoinvent v3.5.) en remplaçant les taux de

fuites du HFO-R134a aux diverses étapes de production par des fuites de pouvoir réchauffant 7 kg CO_2 eq/ kg [37].

Lors de sa phase d'usage, ce réfrigérant est modélisé par un flux de CO_2 correspondant à son PRG (7 kg de CO_2 par kg de réfrigérant). Le CO_2 a un facteur de caractérisation uniquement pour l'indicateur changement climatique. Les impacts potentiels dans les autres catégories d'impact sont donc considérés nuls.

C'est également le cas de la modélisation du bromure de lithium, pour lequel la base de données ecoinvent v3.5. ne fournit pas non plus de procédé. Conformément à [38], la solution de bromure de lithium considérée pour un groupe froid à absorption est créée à partir d'hydroxyde de lithium et de bromure d'hydrogène.

$$LiOH + HBr \rightarrow LiBr + H_2O$$

L'inventaire de cycle de vie n'étant pas disponible pour le HBr, la composition du LiBr est donc approximée par la composition matière ci-dessous [39]:

Material	Quantity	Unit
Ethylene glycol	0.3324	kg
Lithium hydroxide	0.4125	kg
Bromine	1.3935	kg
Tap water	1.2187	kg

Figure 4-4 : Inventaire de production du LiBr

L'inventaire de ce réfrigérant se limite à sa composition matière, faute d'informations suffisantes sur l'énergie d'activation nécessaire à ce procédé. Cet apport énergétique est négligeable (en impacts environnementaux) sur des procédés similaires comme celui du bromure d'éthylène (« Ethylene bromide {RER}| production | Cut-off, U ») ou de l'hydroxyde de lithium (« Lithium hydroxide {GLO}| production | Cut-off, U ») .

Concernant les emballages, ils ont été estimés en carton à 5% de la masse des équipements sur une hypothèse CRIGEN, à l'exception des réseaux et des tubes de forage qui n'ont pas d'emballages. Cette hypothèse potentiellement majorante (les gros équipements ne sont pas emballés) n'a qu'une influence très faible sur les résultats calculés.

Les procédés utilisés pour ces inventaires sont disponibles en Annexe 1.

4.2 Inventaire de Cycle de Vie de l'ensemble des systèmes

4.2.1 La composition matière

Les principales hypothèses relatives à la composition matière des différents systèmes modélisés dans le cadre de cette étude sont présentées dans le tableau suivant. Un paragraphe est dédié à chaque cas d'étude, où le type et la masse totale de chaque composant du système sont présentés. Ensuite, le lecteur peut se référer au tableau ci-dessous pour comprendre la répartition entre les différents matériaux modélisés. Ce tableau est commun à tous les cas d'étude.

Tableau 4-3 : Composition matière des différents systèmes modélisés

Elément	Composition matière		Source
Pompe à chaleur de grande puissance	Réfrigérant	R1234ze	Expertise Tractebel basée sur des dossiers techniques
	Condenseur	Acier carbone	

Elément	Composition matière		Source
	Evaporateur	Acier carbone	de Trane sur les groupes froids [40]
	Moteur	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
Chaudière de grande puissance	Inox (95%) et cuivre (5%)		Dossier technique Viessmann [24]
Pompe du réseau	Fonte (60%) et cuivre (40%)		Dossier technique Grundfos [32]
Câble électrique	Cuivre		Hypothèse Tractebel
Transformateur	Acier (50%), cuivre (31%) et lubrifiant (19%)		Dossier technique de Cahors [36]
Equipements électriques	Acier (25%), nickel (10%) et PVC (65%)		Hypothèse Tractebel
Régulation	Equivalent PC		Hypothèse Tractebel
Sonde 200 m	PE		Demande d'autorisation d'exploitation [41] (page 53)
Sonde 60 m	Acier carbone		Expertise Tractebel
Raccordement entre sondes	PE (45%) et PU (55%)		Pour le PEHD : une demande d'exploitation [41]. Pour le PU : expertise Tractebel
Ciment bentonitique	Ciment (80%) et bentonite (20%)		Demande d'autorisation d'exploitation, page 69
Antigel	Eau (65%) et glycol (35%)		Demande d'autorisation d'exploitation [41] (page 72)
Forage	Diesel		
Réseau de chaleur	PEHD (80%) et PU (20%)		Expertise Tractebel
Sous-station	Acier inox		Documentation technique Unical [42]
Ballon tampon	Acier (70%), PE (17%) et laine de roche (13%)		PEP Ecopassport [21]
Génie civil	Béton (95%) et acier (5%)		REX Tractebel
Cheminée	Béton (77%), acier (4%), acier inox (19%) et laine de roche		REX Tractebel
Pont roulant	Acier carbone		Documentation technique Europont Verlinde [43]
Raccordement à la nappe	Acier carbone (64%) et mousse PU (36%)		REX Tractebel
Chaudière de petite puissance	Acier (40%) , acier inox (24%), fonte ,aluminium cuivre, plastiques…		PEP Ecopassport [28]
Pompe à chaleur aérothermie	Condenseur (25%)	Aluminium	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (30%)	Cuivre (80%) et aluminium (20%)	
	Moteur (30%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et huile (5%)	
	Réfrigérant (15%)	R1234ze	
TFP	Condenseur (30%)	Acier inox	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (35%)	Cuivre (90%) et nickel (10%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
	Réfrigérant	R 1234ze	
Groupe froid grande puissance	Condenseur (30%)	Acier inox	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (35%)	Cuivre (90%) et nickel (10%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
	Réfrigérant	R1234ze	

Elément	Composition matière		Source
Tour aéroréfrigérante	Aluminium (80%), cuivre (10%) et PP (10%)		Documentation technique de Jacir [44]
Réseau de froid	PEHD (80%) et mousse PU (20%)		Expertise Tractebel
Groupe froid petite puissance	Condenseur (30%)	Aluminium	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (30%)	Cuivre (80%) et aluminium (20%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et huile (5%)	
	Réfrigérant	R1234ze	
TFP 2	Condenseur (30%)	Aluminium	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (30%)	Cuivre (80%) et aluminium (20%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et huile (5%)	
	Réfrigérant	R1234ze	
Groupe froid absorption ammoniac-eau	Condenseur (30%)	Acier inox	Expertise Tractebel basée sur la documentation technique de Robur [45]
	Evaporateur (35%)	Cuivre (90%) et nickel (10%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et huile (5%)	
	Réfrigérant	Eau (50%) et ammoniac (50%)	
Capteur plan petite puissance	Absorbeur (46%)	Verre (80%), Aluminium (15%) et Cuivre (5%)	PEP Ecopassport [22]
	Châssis (24%)	Aluminium (60%) et Acier (40%)	
	Fixations (22%)	Aluminium	
	Isolation (7%)	Isolant	
	Accessoires hydrauliques (1%)	Acier	
Tubes	Acier galvanisé (65%) et laine de verre (35%)		Hypothèses Tractebel
Groupe froid absorption Eau LiBr	Condenseur (30%)	Acier inox	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (35%)	Cuire (90%) et nickel (10%)	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
	Réfrigérant	Eau (50%) et LiBr (50%)	
Pompe à chaleur ammoniac	Condenseur (35%)	Acier carbone	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (35%)	Acier carbone	
	Moteur (30%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
	Réfrigérant	Ammoniac	
Pompe à chaleur hybride	Condenseur (30%)	Acier inox	Hypothèses Tractebel
	Evaporateur (35%)	Acier carbone	
	Moteur (35%)	Cuivre (70%), fonte (25%) et lubrifiant (5%)	
	Réfrigérant	Ammoniac (75%) et eau (25%)	
Capteur plan grande puissance	Acier galvanisé (46%), laine minérale (8%), Aluminium (11%), Verre (31%), Inox (2%), Colle silicone (2%)		Estimatif réalisé par le CRIGEN à partir de la documentation d'un capteur Savosolar Savo 15 SG-M [23]

Elément	Composition matière	Source
Capteur plan sous vide	Cuivre (10%), Tubes de verre (51%), Inox (14%), Laine de verre (7%), Elastomère (3%), Aluminium (15%)	Estimatif réalisé par le CRIGEN à partir de la documentation ecoinvent du procédé Evacuated tube collector {GB}| production | Cut-off, U

Ces inventaires sont modélisés sous SimaPro à l'aide de procédés matière sous les hypothèses de la circular footprint formula comme précisé en 3.2.6, i.e. chaque procédé matière est modélisé en sous-segmentant les procédés suivants :

- production primaire
- production secondaire
- impacts du recyclage (équivalent à procédé de production secondaire dans notre cas)
- crédits du recyclage (équivalent à production primaire dans notre cas)
- impacts de l'incinération
- crédits chaleur de l'incinération
- crédits électricité de l'incinération
- impacts de la mise en décharge et impact du formage.

Outputs to technosphere: Products and co-products

	Amount	Unit
CFF copper	1	kg

Add

Outputs to technosphere: Avoided products

	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min

Add

Inputs

Inputs from nature	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment

Add

Inputs from technosphere: materials/fuels	Amount	Unit
Credits electricity copper	(-1)*(1-CFF_B_copper)*CFF_R3_copper*CFF_XERElec_copper*CFF_LHV_copper = 0	kg
Credits heat copper	(-1)*(1-CFF_B_copper)*CFF_R3_copper*CFF_XERHeat_copper*CFF_LHV_copper = 0	kg
Credits recycling copper	CFF_R2_copper*CFF_TxQout_copper*(CFF_A_copper-1) = -0.76	kg
Production primaire copper	(1-CFF_R1_copper)+(1-CFF_A_copper)*CFF_R1_copper*CFF_TxQin_copper = 0.842	kg
Production secondaire copper	CFF_A_copper*CFF_R1_copper = 0.158	kg
impacts disposal copper	(1-CFF_R2_copper-CFF_R3_copper) = 0.05	kg
Impacts incineration copper	(1-CFF_B_copper)*CFF_R3_copper = 0	kg
Impacts recycling copper	CFF_R2_copper*(1-CFF_A_copper) = 0.76	kg
Downstream process copper	1	kg

Figure 4-5 : Illustration de la modélisation en CFF pour le cuivre

Les procédés ecoinvent utilisés pour la modélisation de ces diverses inventaires sont disponibles en Annexe 1 pour la production (Tableau 8-1), la mise en forme (Tableau 8-2), le transport (Tableau 8-3) et les autres étapes (Tableau 8-4).

4.2.2 Les consommations énergétiques

Les coefficients de performance et rendements des équipements sont estimés annuellement afin de pouvoir calculer la consommation énergétique (en gaz ou en électricité) de ces équipements. Ces valeurs de consommation sont ensuite intégrées au modèle ACV pour les caractériser en impacts. Ce paragraphe vise à présenter la méthodologie estimée pour ces coefficients de performance et non les résultats qui sont présentés en inventaire énergie par scénario (§ 4.X.Y.2).

Les rendements sont calculés sur la base de formules génériques[10],[11] qui sont ensuite calées avec des données constructeurs (dépendantes de la forme de cloche de saturation et de l'angle des isentropes dans le diagramme P/H – diagramme de Mollier[12]).

[10] http://www.insa-strasbourg.fr/fr/programmes-des-etudes/GCE4/GCE4-ogecstmsysther700000008.html
[11] https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/rendement-d-une-chaudiere/
[12] https://www.abcclim.net/diagramme-mollier.html

Calcul des coefficients de performance pour une pompe à chaleur sur eau

$$minimum(\frac{T_c}{(T_c - T_f) * 0.9}; \frac{T_c}{(T_c - T_f) * 0.6} - 1.2 * \frac{T_c}{110 + 273} + 0.8 * \frac{T_f}{50 + 273})$$

Où :

- T_c est la température de production de chaleur en Kelvin
- T_f est la température de production de froid en Kelvin
- -1.2 est le coefficient d'ajustement au chaud entre 0°C et 110 °C
- $+0.8$ est le coefficient d'ajustement au froid entre 0 et 50°C

Calcul des coefficients de performance pour une pompe à chaleur directement sur air

$$minimum(4 * cop_max;$$

$$SI\ T_f < 5°C + 273$$

$$Alors : \frac{T_c}{(T_c - T_f) * 0.45} - 2 * \frac{T_c}{110 + 273} + 0.3 * \frac{T_f}{50 + 273})$$

$$Sinon :\ 1\ )$$

Où :

- $cop_\max$ est le COP maximal déterminé pour un régime de température avec une différence de température entre la source chaude et froide et donc un taux de compression minimal)
- T_c est la température de production de chaleur en Kelvin
- T_f est la température de production de froid en Kelvin
- -2 est le coefficient d'ajustement au chaud entre 0°C et 110 °C
- $+0.3$ est le coefficient d'ajustement au froid entre 0 et 50°C
- 1 représente le COP d'une résistance électrique qui travaille pour éviter le gel de l'évaporateur

Calcul des ratios d'efficacité énergétique pour un groupe froid

$$SI\ T_f > T_c$$

$$Alors : 15$$

$$Sinon : minimum(\frac{T_f}{(T_c - T_f) * 0.9}; \frac{T_f}{(T_c - T_f) * 0.6} - 1.5 * \frac{T_c}{110 + 273} + 1 * \frac{T_f}{50 + 273}; 15)$$

Où :

- T_c est la température de production de chaleur en Kelvin
- T_f est la température de production de froid en Kelvin
- -1.5 est le coefficient d'ajustement au chaud entre 0°C et 100 °C
- $+1$ est le coefficient d'ajustement au froid entre 0 et 50°C
- 15 représente l'EER du free cooling

Calcul des rendements des chaudières

$$\frac{1 - maximum\left(\log\left(\frac{1}{P^2}\right) + 6.5; 0.2\right)}{100} - \frac{0.84}{100} * \frac{60 + \Delta_f}{(21 - \%O_2) * 100} - rm$$

$$+ SI\ T_r + \Delta_f < T_c$$

$$Alors : (r_{max} - 1) * \frac{T_c - \Delta_f + T_r}{T_c}$$

$$Sinon : 0$$

Où :

- P est la puissance de la chaudière en kW²
- 60 est la température de fumée
- Δ_f est la différence de température de fumée
- $\%O_2$ est le pourcentage d'oxygène dans les fumées
- rm est la perte de rendement pour la maintenance
- T_r est la température de retour
- T_c est la température de condensation
- r_{max} est le rendement max de la chaudière en PCI

Le calcul des consommations dans le cas des scénarios solaires sera détaillé au sein des cas d'étude.

Calcul du taux EnR&R

Le taux d'énergie renouvelable et de récupération d'un réseau de chaleur, abrégé « taux EnR&R », représente le pourcentage de la production de chaleur d'origine renouvelable et de récupération par rapport à la production totale de chaleur pour ce réseau. Il a été calculé selon la méthodologie de la Fedene[13].

4.2.3 Les émissions directes et de consommation d'énergie

Les émissions directes et de consommation d'énergie sont établies grâce aux procédés ecoinvent associés. Les inventaires ecoinvent des procédés énergétiques sont disponibles en Annexe 1 (Tableau 8-5). Dans le cas des mix électriques, les émissions sont les émissions associées aux filières de production de l'électricité dans ecoinvent v3.5. les modules utilisés sont les suivants :

- Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si panel, mounted
- Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si panel, mounted
- Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si
- Electricity production, hard coal
- Electricity production, hydro, reservoir, alpine region
- Electricity production, hydro, run-of-river
- Electricity production, natural gas, combined cycle power plant
- Electricity production, natural gas, conventional power plant
- Electricity production, nuclear, pressure water reactor
- Electricity production, oil
- Electricity production, wind, <1MW turbine, onshore
- Electricity production, wind, >3 MW turbine, onshore
- Electricity production, wind, 1-3 MW turbine, offshore
- Electricity production, wind, 1-3 MW turbine, onshore
- Electricity production, heat and power co-generation, biogas, gas engine
- Electricity production, heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical

[13] Disponible à l'adresse : https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/10/Guide_explicatif_fiche-r%C3%A9capitulative-CO2_v2.pdf

- Electricity production, heat and power co-generation, oil
- Electricity production, heat and power co-generation, woodchips, 6667 kW

Les systèmes centralisés alimentés à l'électricité sont supposés alimentés en moyenne tension. Les systèmes décentralisés sont alimentés en basse tension. Cette même distinction est faite pour la pression du gaz.

L'électricité produite à partir de biogaz prend en compte un mix pondéré de biogaz produit à partir d'effluents d'élevages, de résidus organiques et de boues. En logique « Cut-Off », seuls les effluents d'élevage sont présupposés avoir des impacts (les autres étant intégrés dans les fins de vie d'autres produits). Il est important de noter que le mix français ecoinvent fait appel à des mix internationaux notamment dans la consommation d'énergie (électricité+ chaleur à base d'anthracite).

L'approvisionnement en gaz est modélisé selon les procédés ecoinvent « *Natural gas, high pressure* » et « *Natural gas, low pressure* ». Les émissions directes de la combustion du gaz sont celles des procédés « *heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW* » et « *heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW* » adaptées avec des mix électriques français. Les émissions de NOx ont également été adaptées pour répondre aux réglementations en vigueur :

- Pour les petites puissances, la norme sur les chaudières utilisant les combustibles gazeux[14] promeut pour les nouvelles chaudières des valeurs limites d'émissions à 56 g NOx par kWh PCS de gaz, i.e. 60 g NOx/ kWh.
- Pour les grandes puissances, la directive européenne 2015/2193 [15] indique comme valeur limite d'émissions de NOx pour les moyennes et grandes installations une valeur de 100 g NOx / Nm^3 soit environ 40 g par kWh PCI de gaz (chaudières à condensation).

Concernant les émissions directes des fuites de réfrigérant R1234ze, elles ont été modélisées par des flux de CO_2 correspondant à leur pouvoir réchauffant compensés par de la production pour combler la fuite, les autres impacts étant exclus. Les taux génériques de fuite appliqués aux appareils thermodynamiques sont les suivants [46]:

- 3% pendant l'installation
- 6% pendant le fonctionnement

[14] NF EN 15502-1+A1
[15] Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants (MCP Directive)

4.2.4 Les coefficients de fin de vie

Les coefficients de fin de vie appliqués à la *circular footprint formula*, présentée au § 3.2.6, sont les suivants :

Tableau 4-4 : Coefficients utilisés pour la Circular Footprint Formula, par matériau

	A	B	Q_{Sin}	Q_{Sout}	R1	R2	R3	LHV * $X_{ER,elec}$	LHV * $X_{ER,heat}$	Source(s)
Acier Réseau	0.2	1	1	1	0.54	0	0	0	0	A, R1 : Annexe C PEF v6.3.[16] R2 et R3 adaptés à la fin de vie des réseaux (Tractebel) B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
PE Réseaux	0.5	1	1	1	0	0	0	3.47	5.55	
PU Réseaux	0.5	1	1	1	0	0	0	7.69	3.95	
Elastomère	0.5	1	1	1	0	0	0.64	6.34	3.23	A, R1, R2, R3 : Annexe C PEF v6.3.[16] B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
Laiton	0.2	1	1	1	0	0	0	0	0	
Cuivre	0.2	1	1	1	0.79	0.95	0	0	0	
Acier	0.2	1	1	1	0.54	0.9	0	0	0	
Inox	0.2	1	1	1	0.54	0.9	0	0	0	
Aluminium	0.2	1	1	1	0	0.8	0	0	0	
Nickel	0.2	1	1	1	0	0	0	0	0	
Fonte	0.2	1	1	1	0.54	0.9	0	0	0	
Lubrifiant	0.5	1	1	1	0	0.3	0.448	17.11	2.44	
PVC	0.5	1	1	1	0	0.32	0.43	2.28	4.66	
PP	0.5	1	1	1	0	0.27	0.43	3.47	5.55	
PS	0.5	1	1	1	0	0	0.64	9.72	5.04	
PE	0.5	1	1	1	0	0.275	0.43	3.47	5.55	
Laine de roche	0.5	1	1	1	0	0.25	0	2.85	1.39	
PU	0.5	1	1	1	0	0	0.64	7.69	3.95	
Packaging carton	0.5	1	1	1	0	0	0.64	7.69	3.95	

[16] https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEFCR_OEFSR_en.htm

	A	B	Q_{Sin}	Q_{Sout}	R1	R2	R3	LHV * $X_{ER,elec}$	LHV * $X_{ER,heat}$	Source(s)
Aluminium pour les modules de fixation PV	0.2	1	1	1	0.32	0.95	0	0	0	A, R1 : Annexe C PEF v6.3.[16] R2 et R3 adaptés à la fin de vie des fixations des panneaux solaires (ref) B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
Verre_PV	0.2	1	1	1	0	0	0	0	0	A, R1 : Annexe C PEF v6.3.[16] R2 et R3 adaptés à la fin de vie des panneaux solaires B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
Aluminium_PV	0.2	1	1	1	0.32	0,9	0	0	0	
Acier_PV	0.2	1	1	1	0.37	0,9	0	0	0	
PVC_PV	0.5	1	1	1	0	0	0.64	4.66	2.28	
Cuivre_PV	0.2	1	1	1	0.44	0,9	0	0	0	
PS_PV	0.5	1	1	1	0	0	0.64	9.72	5.04	
Réfrigérant	0.5	1	1	1	0	0.5	0.5	17.11	1.27	A, R1 : Annexe C PEF v6.3.[16] R2 et R3 extrapolés de la fin de vie des réfrigérants automobiles avec un R2 correspondant à de la réutilisation [17] B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
Glycol	0.5	1	1	1	0	0	0	17.11	1.27	A, R1 : Annexe C PEF v6.3.[16] R2 et R3 adaptés à la fin de vie du glycol (CRIGEN) B : paramètre de l'étude Qsin, Qsout à 1 LHV*XER : ecoinvent v3.5.
Béton	0.2	1	1	1	0	0	0	0	0	Expertise CRIGEN

[17] https://www.syderep.ademe.fr/fr/commun/vhu

4.3 Cas d'étude 1

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 1 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.3.1 S1-RC1 : PAC centralisée sur capteurs géothermiques

4.3.1.1 Inventaire matière

2 pompes à chaleur de 0,85 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Elément (par PAC)	Source
5t	Fiche technique Carrier [29] (page 10, modèle 261)

Les pompes à chaleur sont chargées de 160 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

2 chaudières de 2,6 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
4,3 t	Fiche technique Viessmann [24] (page 4, taille, modèle 6 bars)

7 pompes du réseau avec une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
700 kg	Estimatif Tractebel basé sur de la documentation Grundfos [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un mètre de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

2 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par transformateur)	Source
890 kg	Fiche technique de Cahors [36] (page 159, modèle de puissance 250 kVA)

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
110 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

162,5 sondes de 200 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par m de sonde)	Source
6,28 kg	Estimatif réalisé par Tractebel avec une masse volumique pour le PE de 930 kg/m3 et sur des diamètres issus d'une demande d'autorisation d'exploitation [41] (page 40, tableau 7)

162,5 raccordements entre sondes d'une durée de 10 ans :

Masse	Source
4,54 kg	Estimatif réalisé par Tractebel.

Du ciment bentonitique qui contient la sonde d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m de sonde)	Source
22.5kg	Chaque sonde de 200 m demande une quantité de 3 m^3 de béton donnée dans [41] (page 40)

Du glycol d'une durée de vie de 10 ans :

Composition	Source
118316 kg	Une masse volumique de 1 036 kg/m^3 de glycol a été considérée et une hypothèse de 35 % de glycol contenu dans l'eau glycolée .estimée à 336 m^3.

Une consommation de gazole pour chaque forage de 200 m :

Composition	Source
605 litres de diesel par forage	Basé sur l'estimatif du document [47] (page 98)

Un réseau de chaleur de 4 376 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif est issu d'un REX Tractebel avec des masses volumiques pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

50 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
133 kg	La masse se base sur le modèle BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

4 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 5 000 L :

Masse par ballon	Source
2155 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir d'une fiche PEP [21]

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
7800 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.3.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S1-RC1 :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	10 177 833
Production de chaleur	kWh th	10 686 725
Consommation électrique PAC	kWh elec	2 729 868
COP de la PAC		3,1
Consommation gaz naturel chaudière	kWh (PCI)	2 172 415
Rendement saisonnier chaudière		98,5 %
Consommation pompe électrique	kWh elec	916 005
Taux EnR&R injecté dans le réseau		54 %

La répartition de la production entre le système principal et le système d'appoint au cours de l'année est présentée dans l'histogramme suivant :

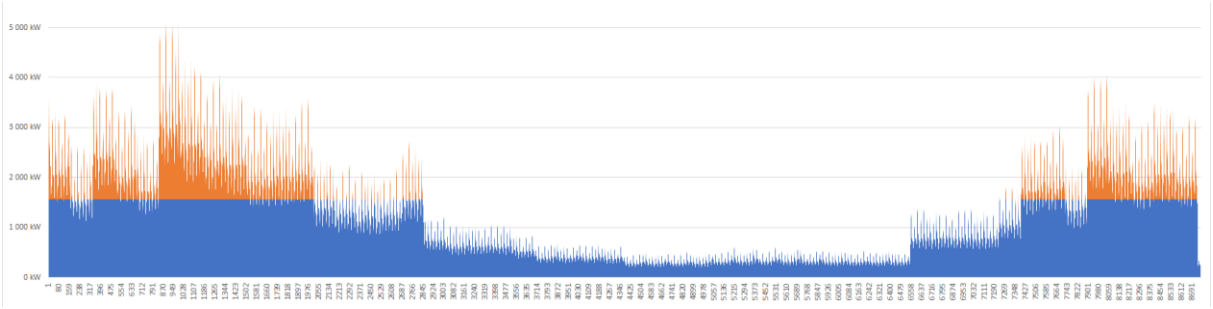


Figure 4-6 : Histogramme de production pour le système S1-RC1 (bleu = PAC, orange = chaudière)

En termes de consommation, les pompes à chaleur consomment 2,7 GWh d'électricité (selon un mix dynamique) et l'appoint de la chaudière représente 2,2 GWh de gaz (PCI). Les autres pompes (celles des réseaux etc.) représentent 920 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement).

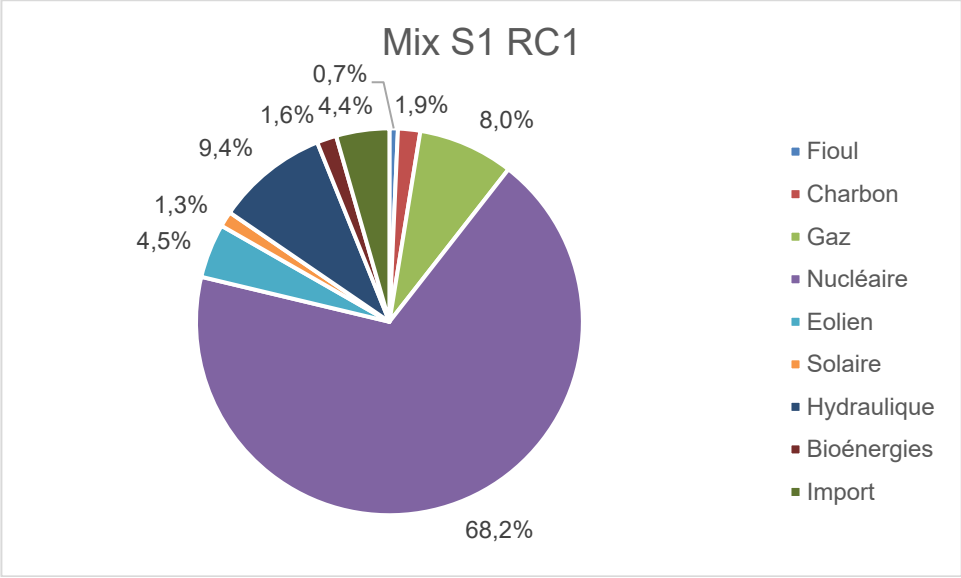


Figure 4-7 : Mix électrique spécifique au système S1-RC1

4.3.1.3 Qualité des données

Tableau 13 : Qualité des données pour le S1-RC1

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompe à chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 200m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement entre sonde									
	Eau glycolée									
	Réseau de Chaleur									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminé									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont globalement de bonne qualité. Un point d'attention mérite d'être relevé sur la cogénération biogaz qui est un « faux » procédé français (i.e. constitué de procédés globaux) basé sur du biogaz de fumier, de déchets organiques et de boues. Cette donnée a été prise faute de données plus complètes d'inventaire de cycle de vie mais elle reflète peu le contexte français actuel : le mix considéré est seulement un mix pondéré de trois filières, le taux de fuite est estimé à 10%, le stockage est toujours à l'air libre sans récupération, le process fait intervenir de la chaleur issue de charbon etc. A titre d'exemple, ce procédé donne 120 g CO_2 eq. / kWh de biogaz alors que la base carbone[18] titre 44.1 g CO_2 eq. / kWh de biométhane (purifié). L'interprétation de la contribution de ce procédé est donc à faire avec prudence.

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.3.2 S1-RC2 : PAC centralisée sur nappe phréatique

4.3.2.1 Inventaire matière

2 pompes à chaleur de 0,85 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Elément (par PAC)	Source
5 t	Fiche technique Carrier [29] (page 10, modèle 261)

Les pompes à chaleur sont chargées de 160 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

2 chaudières de 2,6 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
4,3 t	Fiche technique Viessmann [24] (page 4, taille, modèle 6 bars)

7 pompes du réseau avec une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
700 kg	Estimatif Tractebel basé sur de la documentation Grundfos [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

3 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse par transformateur	Source
2900 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique de Cahors pour un modèle de puissance 250 kVA [36] (page 159)

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
110 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

[18] https://www.bilans-ges.ademe.fr/

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

20 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1m)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel.

200 raccordements à la nappe d'une durée de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60 m :

Composition	Source
182 litres de diesel par forage	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)

Un réseau de chaleur de 4 376 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif est issu d'un REX Tractebel avec des masses volumiques pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

50 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
133 kg	La masse et la composition matière se base sur les modèle BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

4 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 5000L :

Masse par ballon	Source
2 155 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
7 800 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m (page 23)

4.3.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S1-RC2 :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	10 177 833
Production de chaleur	kWh th	10 686 725
Consommation électrique PAC	kWh elec	2 160 472
COP de la PAC		4,1

Paramètre	Unité	Valeur
Consommation gaz naturel chaudière	kWh (PCI)	1 854930
Rendement saisonnier chaudière		98,5 %
Consommation pompe électrique	kWh elec	763 337
Taux EnR&R injecté dans le réseau		63 %

La répartition de la production entre le système principal et le système d'appoint au cours de l'année est présentée dans l'histogramme suivant :

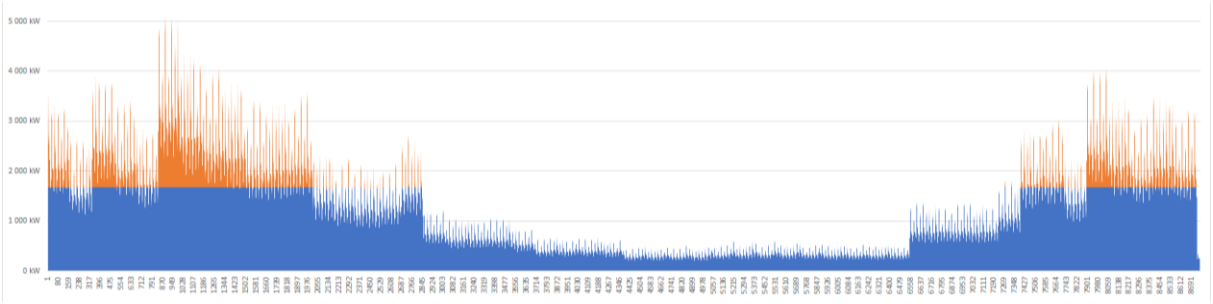


Figure 4-8 : Histogramme de production pour le système S1-RC2 (bleu = PAC, orange = chaudière)

En termes de consommation, les pompes à chaleur consomment 2,2 GWh d'électricité (selon un mix dynamique) et l'appoint de la chaudière représente 1,8 GWh de gaz (PCI). Les pompes autres (réseaux etc.) représentent 760 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement).

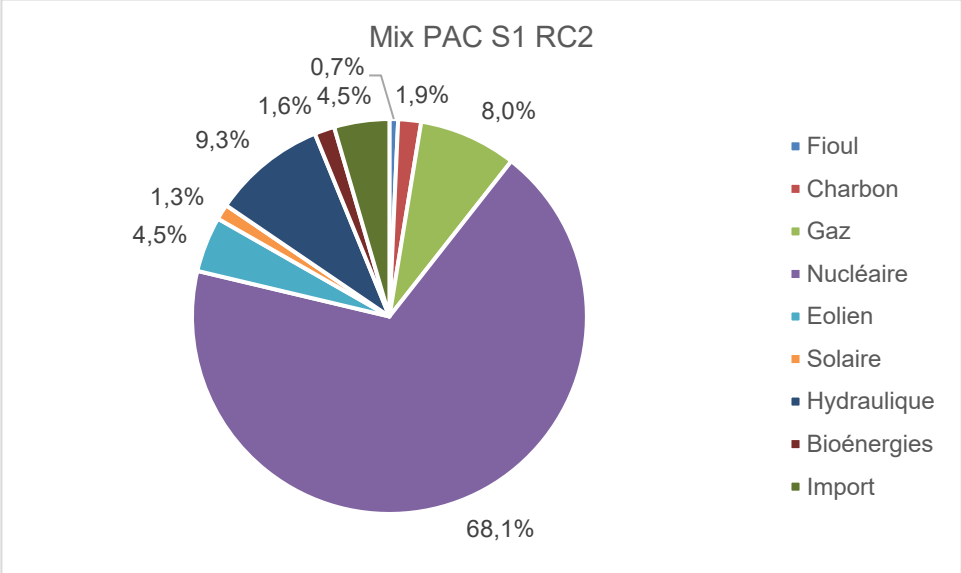


Figure 4-9 : Mix électrique spécifique au système S1-RC2

Ce camembert présente le mix moyen annuel du système S1-RC2 dont la consommation varie selon l'histogramme présenté en Figure 4-8.

4.3.2.3 *Qualité des données*

Tableau 4-5 : Qualité des données pour le S1-RC2

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompe à chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Réseau de Chaleur									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminé									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.3.3 S1-Créf : Chaufferie gaz

4.3.3.1 Inventaire matière

4 chaudières de 1,7 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
3,2 t	Les données se basent sur une fiche technique de Viessmann [24] (page 4, modèle 5, 6 bars)

5 pompes du réseau avec une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
700 kg	Estimatif Tractebel basé sur de la documentation Grundfos [32]

30 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
10 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC dont le nombre varie pour chaque scénario. La quantification est réalisée par Tractebel.

Un réseau de chaleur de 4 376 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif est issu d'un REX Tractebel avec des masses volumiques pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

50 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 5000L :

Composition (pour 1 sous station)	Source
133 kg	La masse et la composition matière se base sur les modèles BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

4 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse par ballon	Source

2 155 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
800 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.3.3.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S1-Cref :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	10 177 833
Production de chaleur	kWh th	10 686 725
Consommation gaz naturel chaudière	kWh (PCI)	10 853 911
Rendement saisonnier chaudière		98,5 %
Consommation pompe électrique	kWh elec	305 335

En termes de consommation, les chaudières consomment 10,8 GWh de gaz (PCI). Les pompes autres (réseaux etc.) représentent 305 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement).

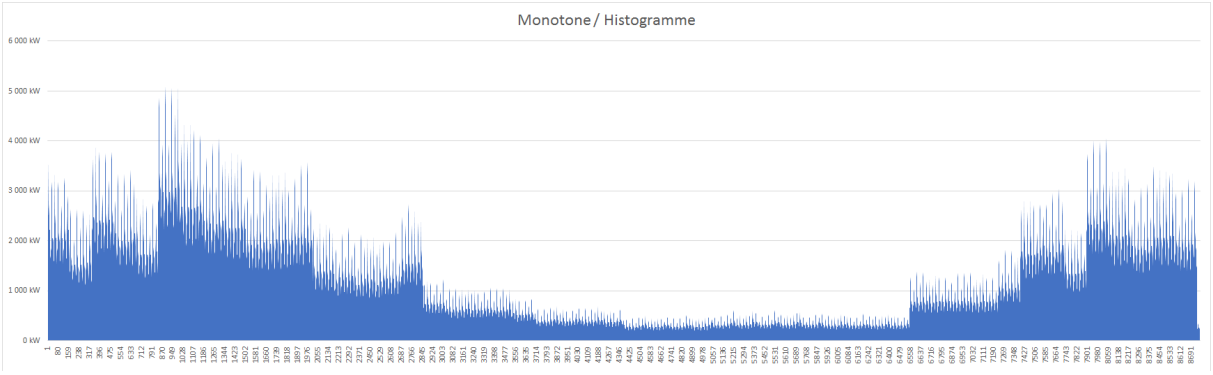


Figure 4-10 : Histogramme de production pour le système S1-Créf

4.3.3.3 Qualité des données

Tableau 4-6 : Qualité des données pour le S1-Cref

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Réseau de Chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminé									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.3.4 S1-Dréf1 : Chaudières gaz par bâtiment

4.3.4.1 Inventaire matière

50 chaudières de 100 kW d'une durée de vie de 22 ans :

Masse d'une chaudière	Source
187 kg	Fiche PEP EcoPassport [28]

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent en PC. La quantification est réalisée par Tractebel. Le tout est multiplié par le nombre de bâtiments, i.e. 50.

4.3.4.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S1-Dref1 :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	10 177 833
Production de chaleur	kWh th	10 177 833
Consommation gaz naturel chaudière	kWh (PCI)	11 458 298
Rendement saisonnier chaudière		89.8 %

En termes de consommation, les chaudières individuelles consomment 11,5 GWh de gaz (PCI).

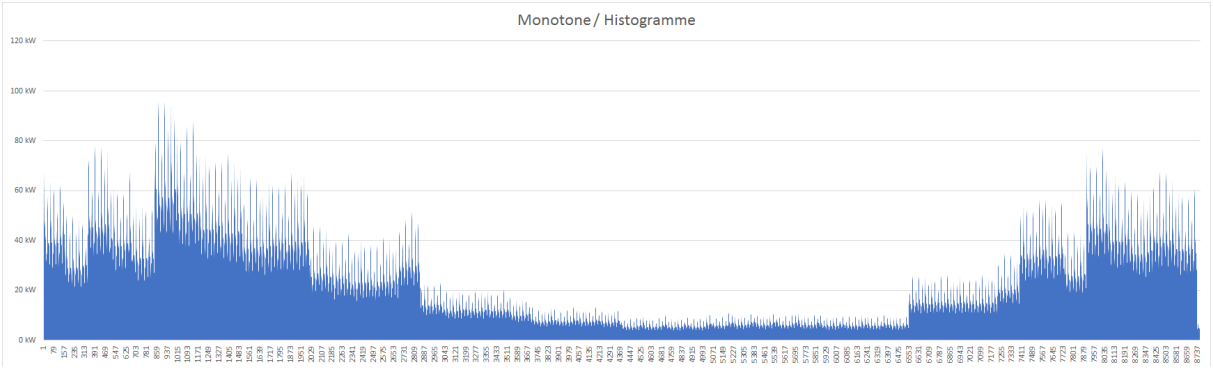


Figure 4-11 : Histogramme de production pour le système S1-Dref1

4.3.4.3 *Qualité des données*

Tableau 4-7 : Qualité des données pour le S1-Dref1

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français
	Transformateur					
	Equipements électriques					
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée
	Emissions directes					
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
	Chaudière				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Cables électriques				
	Transformateur				
	Equipements électriques				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging				
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz				Mix français
	Emissions directes				Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.3.5 S1-Dréf 2 : PAC air/eau par bâtiment

4.3.5.1 *Inventaire matière*

1 Pompe à chaleur aérothermie de puissance 100 kW d'une durée de vie de 22 ans :

Masse	Source
1 800 kg	Hypothèses Tractebel basées sur la documentation de Viessmann [31] (page 4)

Les pompes à chaleur sont chargées de 90 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Le tout est multiplié par le nombre de bâtiments, i.e. 50.

Un transformateur de quartier de 850 kg est également ajouté dans ce scénario.

4.3.5.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S1-Dref2 :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	10 177 833
Production de chaleur	kWh th	10 177 833
Consommation électrique PAC	kWh elec	4 479 312
COP		2.3

Dans les périodes de très forte demande, un appoint est réalisé par une résistance électrique présente dans l'équipement. Sa consommation électrique est intégrée à la valeur présentée dans le tableau ci-dessus. La répartition de la production entre le système principal et le système d'appoint au cours de l'année est présentée dans l'histogramme suivant :

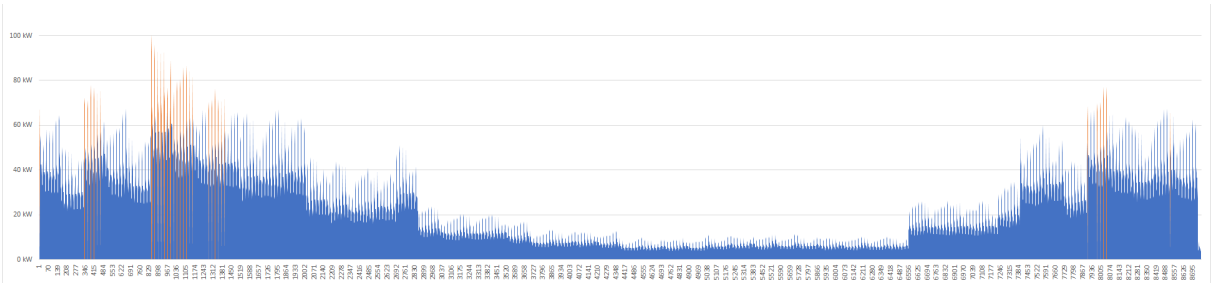


Figure 4-12 : Histogramme de production pour le système S1-Dref2 (bleu = PAC, orange = résistances électriques)

En termes de consommation, les pompes à chaleur individuelles consomment 4,5 GWh d'électricité (selon un mix dynamique).

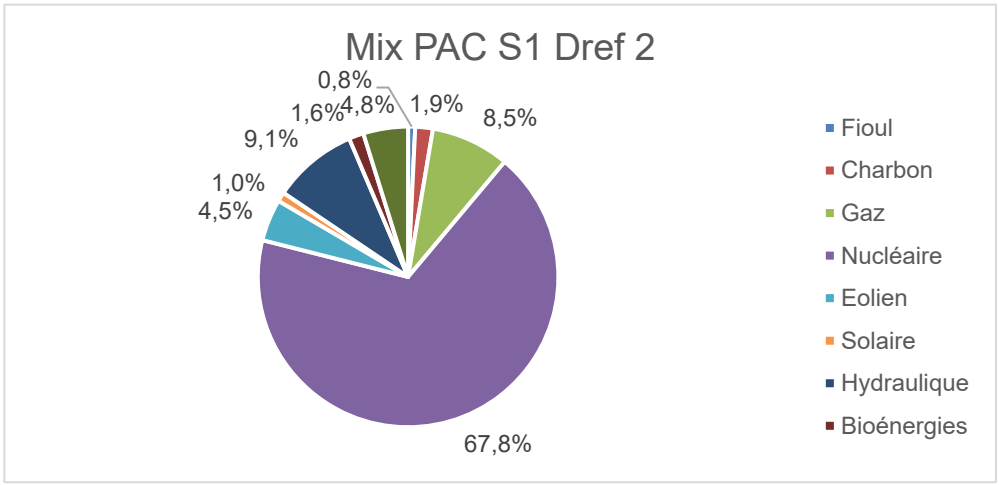


Figure 4-13 : Mix électrique spécifique au système S1-Dref2

4.3.5.3 Qualité des données

Tableau 4-8 : Qualité des données pour le S1-Dref2

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompe à chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français
	Transformateur					
	Equipements électriques					
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Emissions directes					
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompe à chaleur				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Cables électriques				
	Transformateur				
	Equipements électriques				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Emissions directes				Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.4 Cas d'étude 2

La quantité de matière pour chacun des scénarios du cas d'étude 2 est présentée dans les tableaux suivants

4.4.1 S2-RC : Thermofrigopompe centralisée

4.4.1.1 Inventaire matière

1 thermo-frigo-pompe de 315 kW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
2 700 kg	Fiche technique Carrier [29], page 9 modèle 096

La thermofrigopompe est chargée de 120 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

3 chaudières de 350 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
800 kg	Fiche technique De Dietrich [48], page 3 modèle 300 ou 350

3 groupes froids de 350 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par groupe froid)	Source
3 000 kg	Fiche technique Carrier [29], page 9, modèle 106

1 tour aéroréfrigérante de 1,5 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
8 000 kg	Fiche technique Jacir [44], page 14, modèle TH10

11 pompes réseau d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
300 kg	Estimatif Tractebel basé sur de la documentation Grundfos [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

4 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par transformateur)	Source
720 kg	Fiche technique de Cahors [36], page 159

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1m)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel

50 raccordements à la nappe d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60m :

Composition	Source
182 litres de diesel par forage	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)

Un réseau de chaleur de 790 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

20 sous-stations pour le réseau de chaleur d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
70 kg	Extrapolation à partir de la masse du modèle BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

4 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 2 000 L :

Masse par ballon	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un réseau de froid de 974 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

20 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
300 kg	Expertise Tractebel à partir de la documentation technique Unical [42]

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
3 800 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m (page 23)

4.4.1.2 *Inventaire énergie*

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S2-RC :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	1 837 556
Production de chaleur	kWh th	1 929 434
Besoin en froid client	kWh th	2 412 827
Production de froid	kWh th	2 533 468
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	781 197
Consommation de gaz naturel	kWh (PCI)	329 980
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	428 984
COP TFP		3,3
EFF TFP		5,6
EER groupe froid		5,1
Taux EnR&R injecté dans le réseau		75 %

En termes de consommation, les thermo-frigo-pompes consomment 490 MWh d'électricité (selon un mix dynamique) avec un appoint de chaudière à 330 MWh de gaz (PCI) et un appoint électrique (dynamique) pour le groupe froid à 290 MWh. Les pompes du réseau représentent 430 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement).

Les répartitions des productions de chaleur et de froid entre les systèmes principaux et les appoints sont présentés dans les 2 histogrammes ci-dessous :

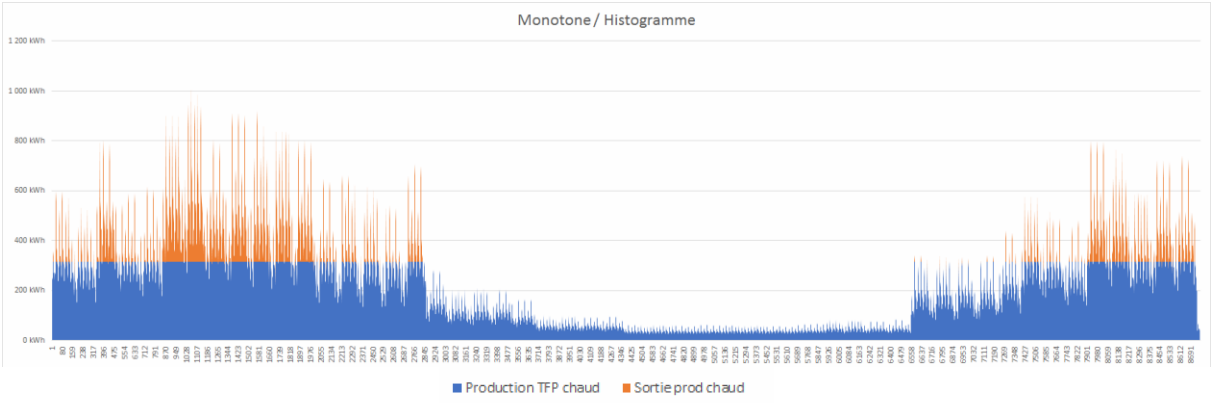


Figure 4-14 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S2-RC (bleu = TFP, orange= gaz naturel)

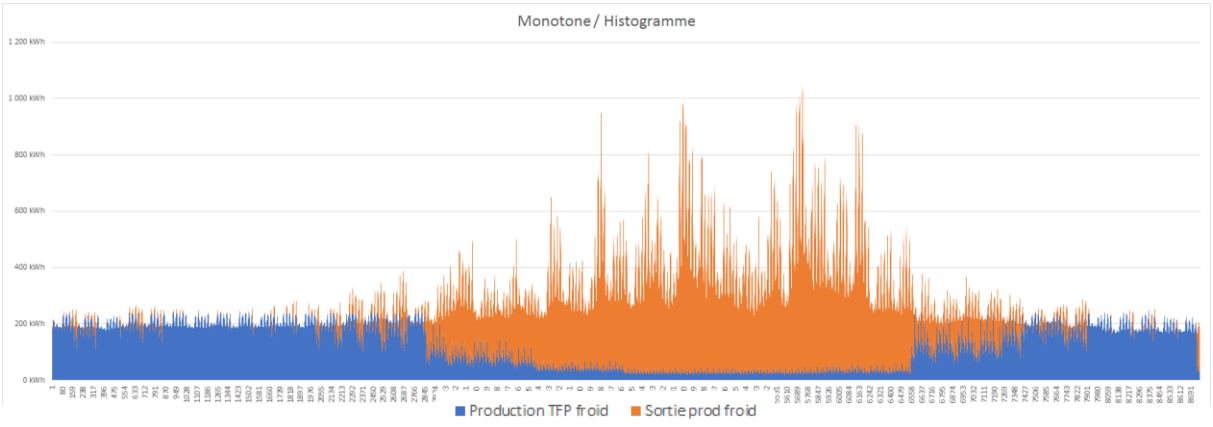


Figure 4-15 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-RC (bleu=TFP, orange=groupe froid)

On remarque qu'en été, du fait de la faible production de chaleur avec la TFP, une grande partie du froid est produit avec le groupe froid (la TFP en mode froid seul aurait aussi pu être modélisée.).

Pour les thermo-frigo-pompes et les groupes froids, des mix électriques dynamiques spécifiques ont été modélisés et sont représentés dans les figures ci-dessous :

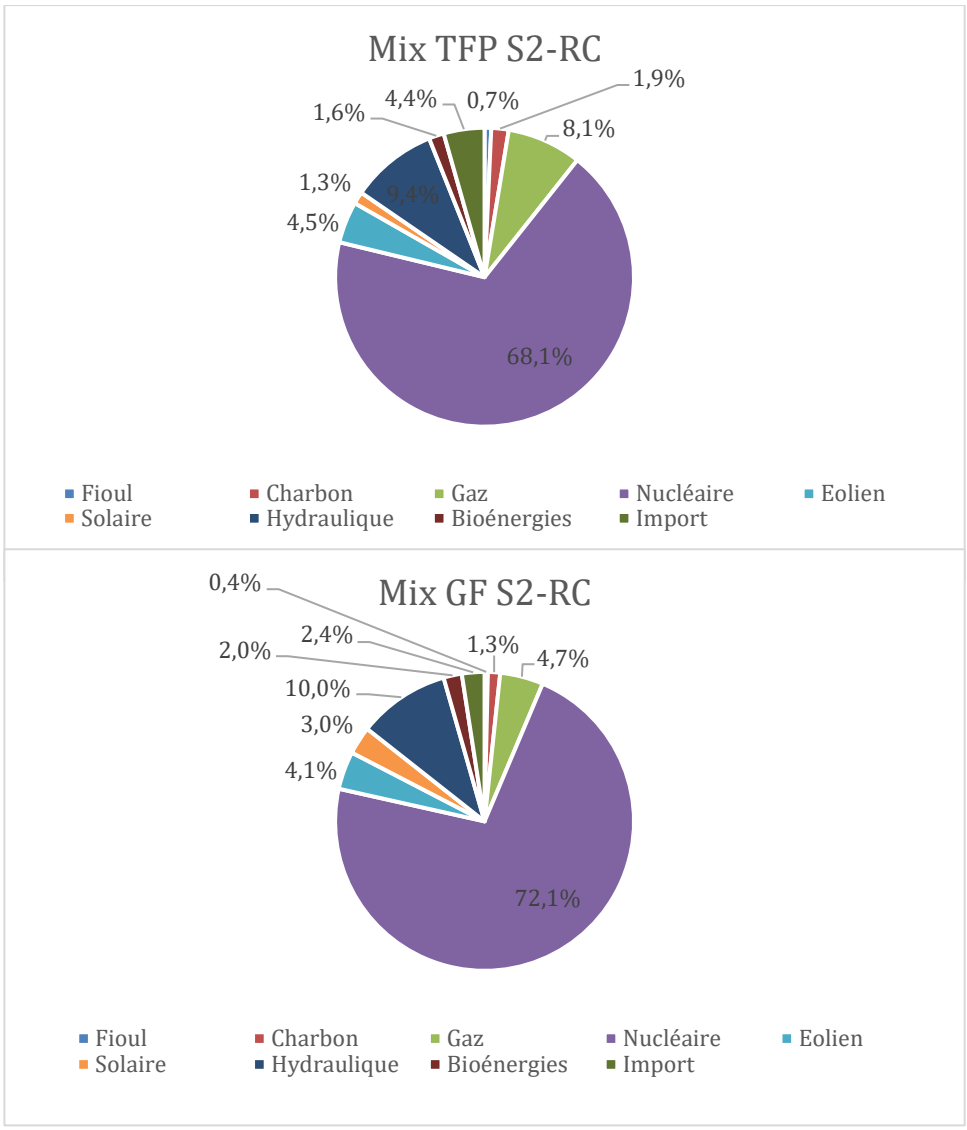


Figure 4-16 : Mix électriques des thermo-frigo-pompes (en haut) et des groupes froids (en bas) du scénario S2-RC

4.4.1.3 *Qualité des données*

Tableau 4-9 : Qualité des données pour le S2-RC

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Thermo-frigo-pompe					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière									
	Groupe froid									
	Tour aéro-réfrigérante									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Réseau de Chaleur									
	Réseau de froid									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminée									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.4.2 S2-Créf : Chaudière gaz et groupe froid

4.4.2.1 Inventaire matière

3 chaudières d'une puissance de 350 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
800 kg	Fiche technique De Dietrich [48], page 3

3 groupes froids d'une puissance de 350 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par groupe froid)	Source
3 000 kg	Fiche technique Carrier [29], page 9, modèle 106

Les groupes froids chargées de 70 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

1 tour aéroréfrigérante d'une puissance de 1,5 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
8 000 kg	Fiche technique Jacir [44], page 16, modèle TH10

11 pompes réseau d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
300 kg	Estimatif Tractebel basé sur de la documentation Grundfos [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

4 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par transformateur)	Source
720 kg	Fiche technique de Cahors [36], page 159

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Un réseau de chaleur de 790 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

20 sous-stations pour le réseau de chaleur d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
70 kg	Extrapolation à partir de la masse du modèle BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

4 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse par ballon	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un réseau de froid de 974 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

20 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
300 kg	Expertise Tractebel à partir de la documentation technique Unical [42]

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
3 800 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m (page 23)

4.4.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S2-Créf :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	1 837 556
Production de chaleur	kWh th	1 929 434
Besoin en froid client	kWh th	2 412 827
Production de froid	kWh th	2 533 468
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	434 152
Consommation de gaz naturel	kWh (PCI)	1 964 774
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	133 264
Taux EnR&R injecté dans le réseau		47 %

Les histogrammes de production de chaleur et de froid sont présentés dans les 2 histogrammes ci-dessous :

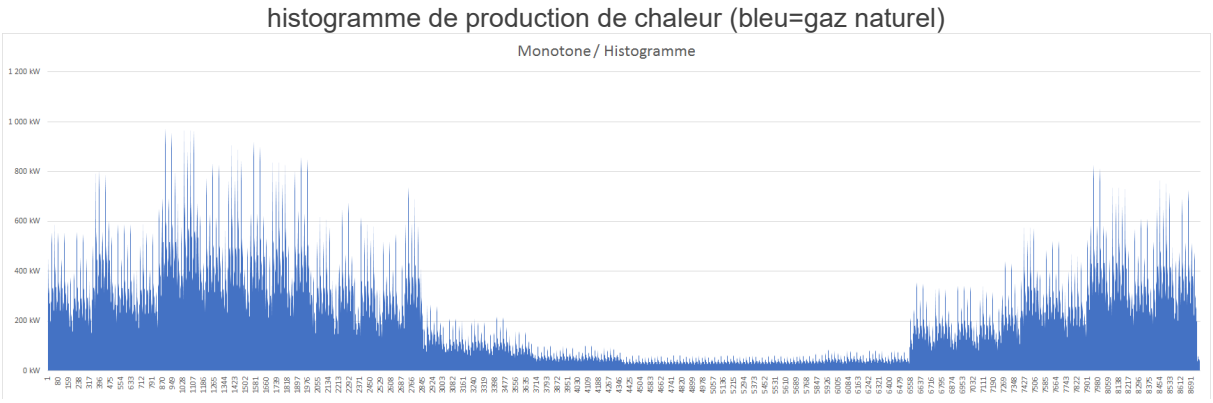


Figure 4-17 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S2-Créf

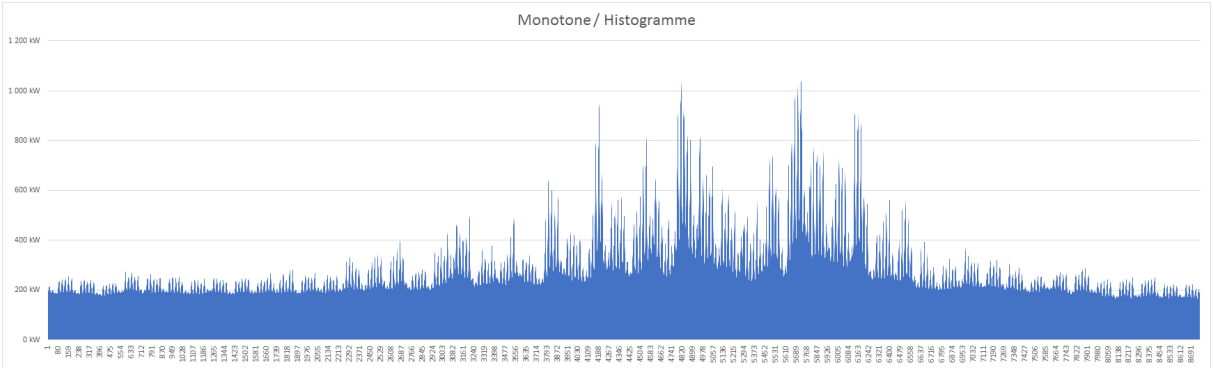


Figure 4-18 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-Créf

En termes de consommation, les groupes froids consomment 430 MWh d'électricité (selon un mix dynamique) et les chaudières consomment près de 2 GWh de gaz (PCI). Les pompes du réseau représentent 130 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement). Le mix électrique dynamique spécifique pour le groupe froid du scénario S2-Cref est présenté ci-dessous :

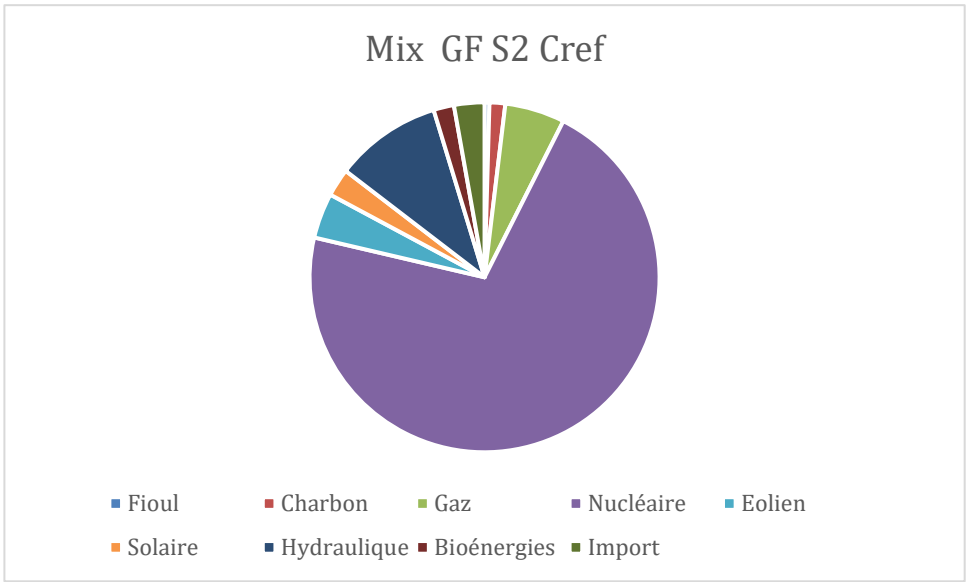


Figure 4-19 : Mix électrique du groupe froid dans le scénario S2-Cref

4.4.2.3 *Qualité des données*

Tableau 4-10 : Qualité des données pour le S2-Cref

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Groupe froid									
	Tour aéro-réfrigérante									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Réseau de Chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Réseau de froid									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminée									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.4.3 S2-Dréf 1 : Chaudières gaz et groupes froids de petite puissance

4.4.3.1 Inventaire matière

20 chaudières de 50 kW et d'une durée de vie de 22 ans :

Masse	Source
70 kg	Basé sur la fiche PEP d'une chaudière [28]

20 groupes froids de puissance 50 kW d'une durée de vie de 15 ans :

Masse	Source
915 kg	Fiche technique Viessmann [31], page 4, modèle AWO 302.A60

Les groupes froids sont chargés de 45 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

La régulation est modélisée par 1 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel. Le tout est multiplié par le nombre de bâtiments, i.e. 20.

4.4.3.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S2-Dréf1 :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	1 837 556
Production de chaleur	kWh th	1 837 556
Besoin en froid client	kWh th	2 412 827
Production de froid	kWh th	2 412 827
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	646 800
EER		3,9
Consommation de gaz naturel	kWh (PCI)	1 998 900
Rendement		91,9 %

Les histogrammes de production de chaleur et de froid sont présentés dans les 2 histogrammes ci-dessous :

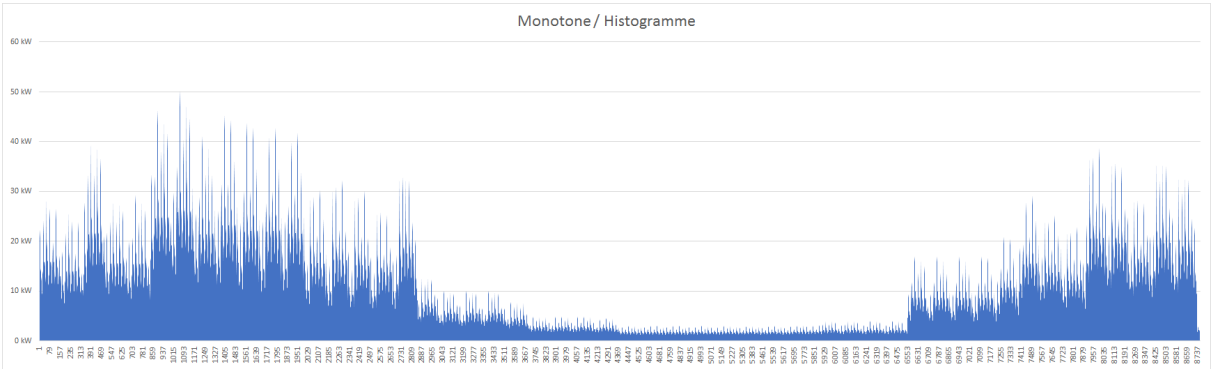


Figure 4-20 : Histogramme de production de chaleur des chaudières individuel au gaz pour le scénario S2-Dref1

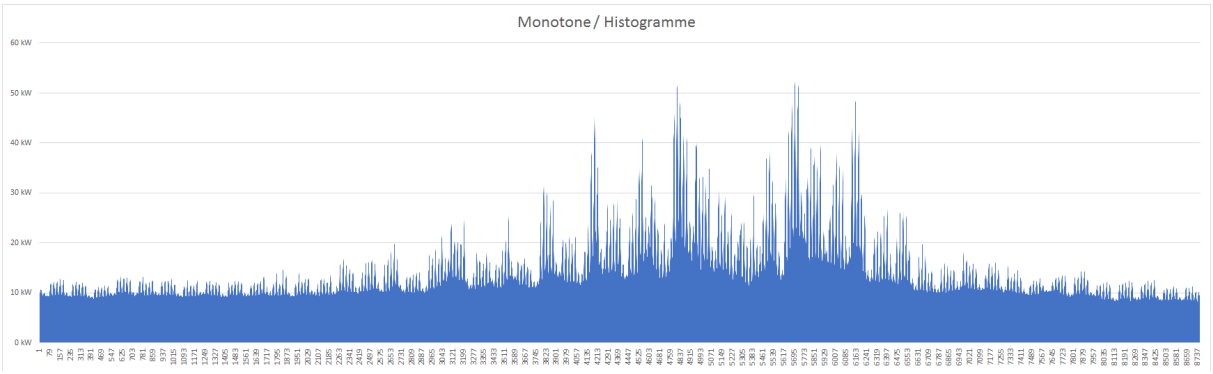


Figure 4-21 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-Dref1

En termes de consommation, les groupes froids consomment 650 MWh d'électricité (selon un mix dynamique) et les chaudières consomment près de 2 GWh de gaz (PCI). Le mix électrique dynamique spécifique modélisé pour les groupes froids est présenté dans la figure ci-dessous :

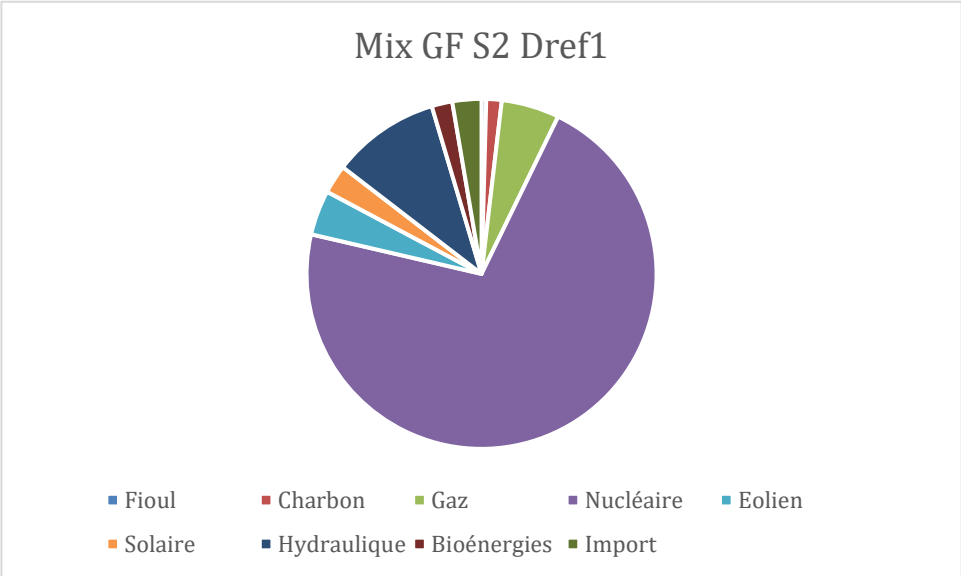


Figure 4-22 : Mix électrique des groupes froids dans le scénario S2-Dref1

4.4.3.3 Qualité des données

Tableau 4-11 : Qualité des données pour le S2-Dref1

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Groupe froid					
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Packaging					Quantité générique de packaging
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée
	Emissions directes					
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
	Chaudière				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus
	Cables électriques				
	Transformateur				
	Equipements électriques				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Fuites de réfrigérant à l'installation				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Packaging				
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz				Mix français
	Emissions directes				Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.4.4 S2-Dref2 : Thermo-frigo-pompe aérothermique

4.4.4.1 Inventaire matière

20 thermo-frigo-pompes de 69 kW et d'une durée de vie de 15 ans :

Masse (par TFP)	Source
500 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique KWT [49]

Les thermofrigopompes sont chargées de 25 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

20 tours aéroréfrigérantes de 67 kW et d'une durée de vie de 15 ans :

Masse (par tour)	Source
800 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Jacir [44], page 12, modèle TM1

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Un transformateur de quartier est également ajouté d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
340 kg	Expertise Tractebel

4.4.4.2 Inventaires énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S2-Dréf2 :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	1 837 556
Production de chaleur	kWh th	1 837 556
Besoin en froid client	kWh th	2 412 827
Production de froid	kWh th	2 412 827
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	811 360
Efficacité globale		5,2

Les histogrammes de production de chaleur et de froid sont présentés dans les 2 histogrammes ci-dessous :

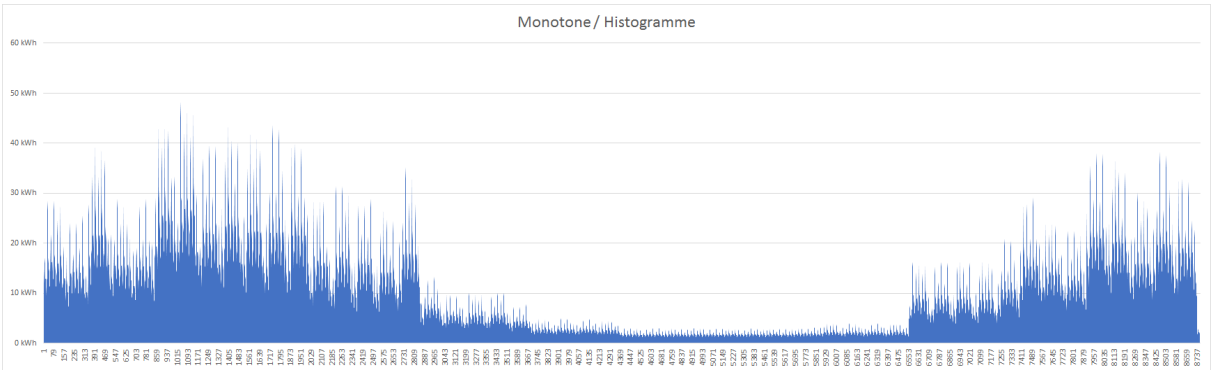


Figure 4-23 : Histogramme de production de chaleur de la TFP individuelle du scénario S2-Dref2

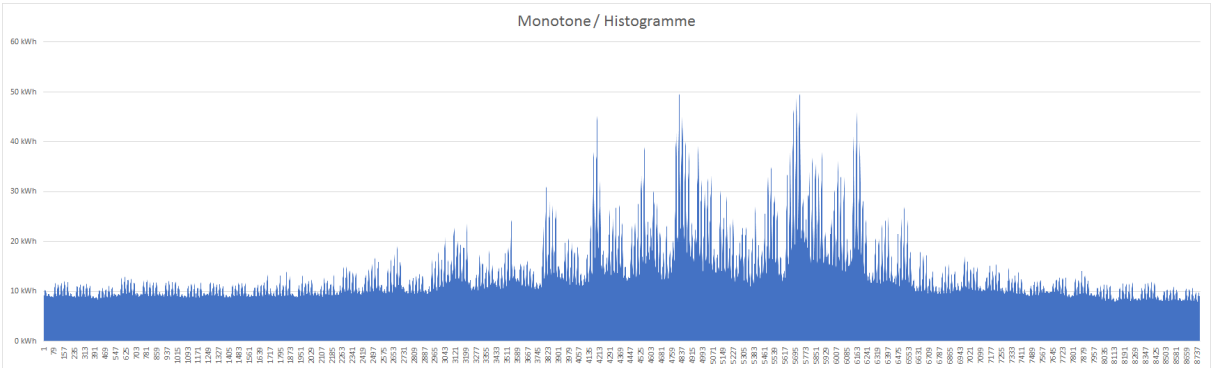


Figure 4-24 : Histogramme de production de froid d'une TFP individuelle du scénario S2-Dref2

En termes de consommation, les thermofrigopompes individuelles consomment 810 MWh d'électricité (selon un mix dynamique). Le mix électrique dynamique spécifique modélisé pour les thermo-frigo-pompes individuelles est présenté dans la figure ci-dessous :

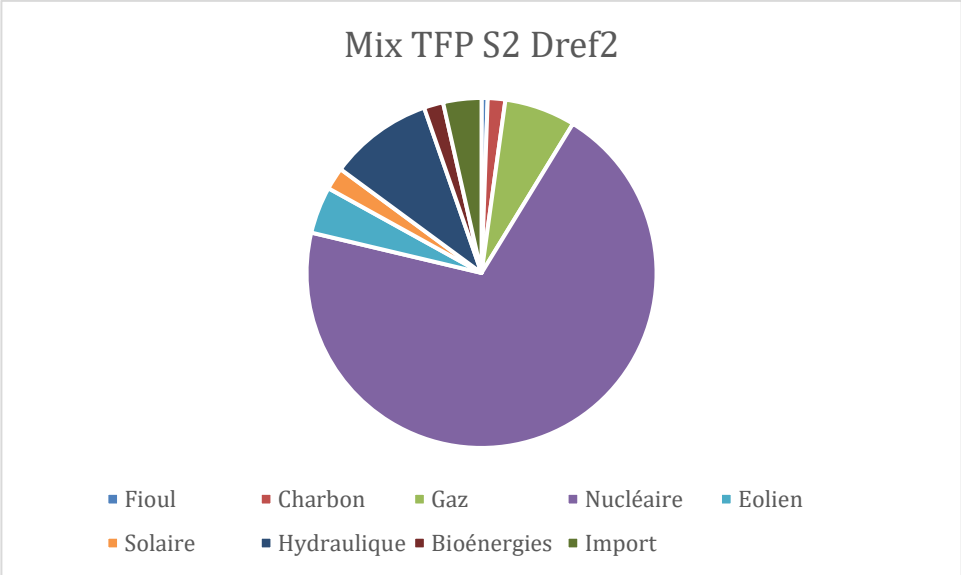


Figure 4-25 : Mix électrique pour les TFP individuelles du scénario Dréf2

4.4.4.3 Qualité des données

Tableau 4-12 : Qualité des données pour le S2-Dref2

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Thermo-frigo-pompe					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Tour aéro-réfrigérante					
	Transformateur					Quantités génériques de ces équipements dans des projets
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Thermo-frigo-pompe				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les
	Tour aéro-réfrigérante				
	Transformateur				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Pertes réfrigérants				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.5 Cas d'étude 3

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 3 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.5.1 S3-RC : Absorption sur nappe phréatique

4.5.1.1 Inventaire matière

1 groupe froid absorption ammoniac eau de 315 kW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
6 000 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Robur [45], page 24

Le groupe froid est chargé de 300 kg de réfrigérant ammoniac/eau (estimatif Tractebel).

2 groupes froids d'une puissance de 500 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par groupe froid)	Source
3 900 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Carrier [29], page 9, modèle 146

Les groupes froids sont chargés de 150 kg de réfrigérant R 1234ze (estimatif Tractebel).

1 tour aéroréfrigérante d'une puissance de 1,5 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
8 000 kg	Fiche technique Jacir [44], page 16, modèle TH10

6 pompes réseau d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source

300 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

3 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par transformateur	Source
2 900 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique de Cahors [36]

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1m)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel.

100 raccordements à la nappe d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60m :

Composition	Source
182 litres de diesel par forage	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)

2 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par ballon)	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un réseau de froid de 1 092 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

10 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
300 kg	Expertise Tractebel à partir de la documentation technique Unical [42]

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.5.1.2 *Inventaires énergie*

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S3-RC :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en froid client	kWh th	2 703 260
Production de froid	kWh th	2 838 423
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	140 012
Consommation en chaleur fatale	kWh th	3 384 217
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	216 261
EER groupe froid absorption		0,69
EER groupe froid compression		5,59
Taux EnR&R injecté dans le réseau		95 %

L'histogramme de répartition de la production de froid entre les groupes à absorption et à compression dans le scénario S3-RC est présenté ci-dessous :

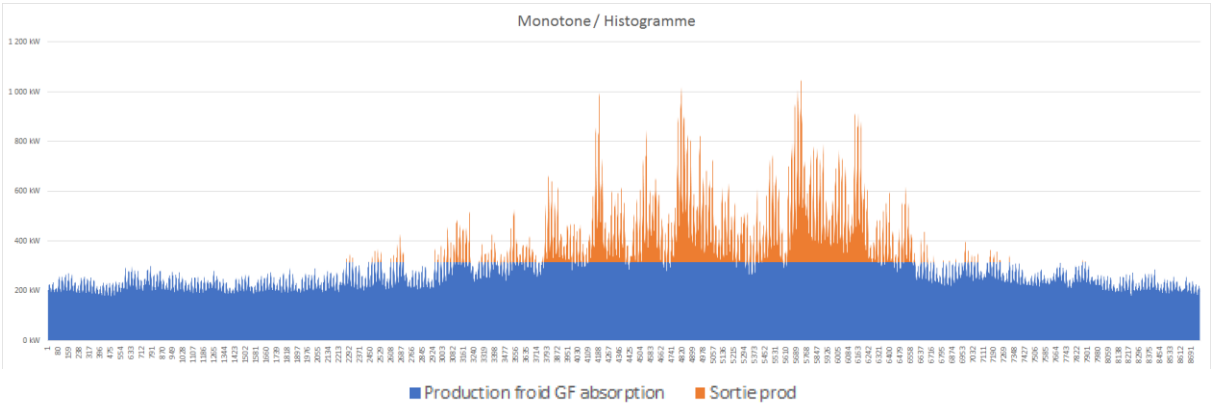
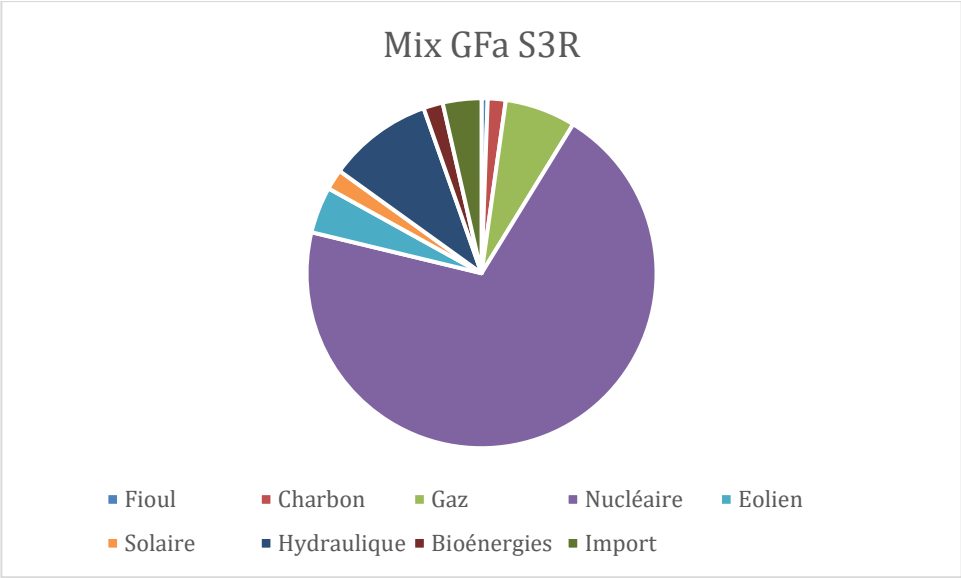


Figure 4-26 : Histogramme de répartition de la production de froid dans le scénario S3-RC

En termes de consommation, les groupes froids à absorption consomme 55 MWh d'électricité (selon un mix dynamique) pour une consommation d'énergie fatale à hauteur de 3 GWh et un appoint électrique (dynamique) pour le groupe froid à 85 MWh. Les pompes du réseau représentent 220 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement). Le mix électrique dynamique spécifique des groupes froids à absorption et compression est présenté ci-dessous :



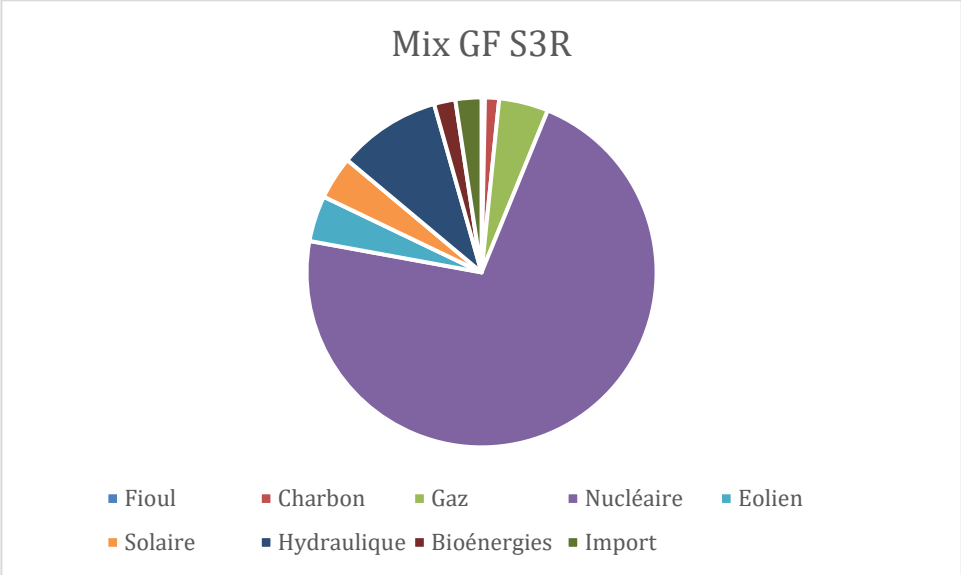


Figure 4-27 : Mix électrique des groupes froids absorption (en haut) et compression (en bas) dans le scénario S3-RC

4.5.1.3 *Qualité des données*

Tableau 4-13 : Qualité des données pour le S3-RC

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid absorption					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Groupe froid									
	Tour aéro-réfrigérante									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Réseau de froid									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Pont roulant 25m 16T					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommation gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.5.2 S3-Cref : Groupe froid à compression sur air

4.5.2.1 Inventaire matière

3 groupes froids de 525 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par groupe froid)	Source
3 900 kg	Extrapolation à partir de la documentation technique Carrier [29], page 9, modèle 146

Les groupes froids sont chargés de 150 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

8 pompes réseau d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
300 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

3 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par transformateur)	Source
2 900 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique de Cahors [36]

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

2 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 2 000 L :

Masse (par ballon)	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un réseau de froid de 1 092 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source

5,26 kg	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

10 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
300 kg	Expertise Tractebel à partir de la documentation technique Unical [42]

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.5.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S3-CRéf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en froid client	kWh th	2 703 260
Production de froid	kWh th	2 838 423
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	398 755
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	108 130
EER groupe froid compression		7,1
Taux EnR&R injecté dans le réseau		86 %

L'histogramme de la production de froid du groupe froid à compression dans le scénario S3-Créf est présenté ci-dessous :

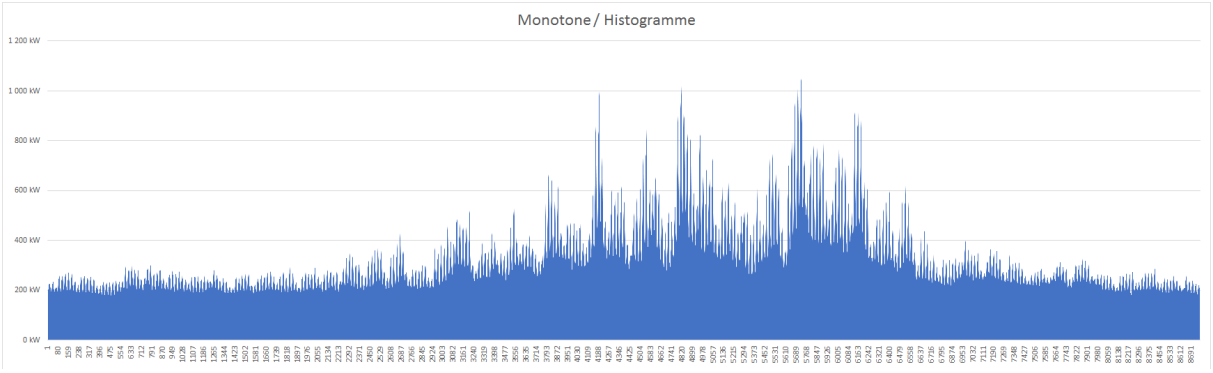


Figure 4-28 : Histogramme de production de froid dans le scénario S3-Cref

En termes de consommation, les groupes froids à absorption consomment 400 MWh d'électricité (selon un mix dynamique). Les pompes du réseau représentent 110 MWh de consommation électrique (supposée homogène annuellement). Le mix électrique spécifique dynamique du groupe froid est présenté ci-dessous :

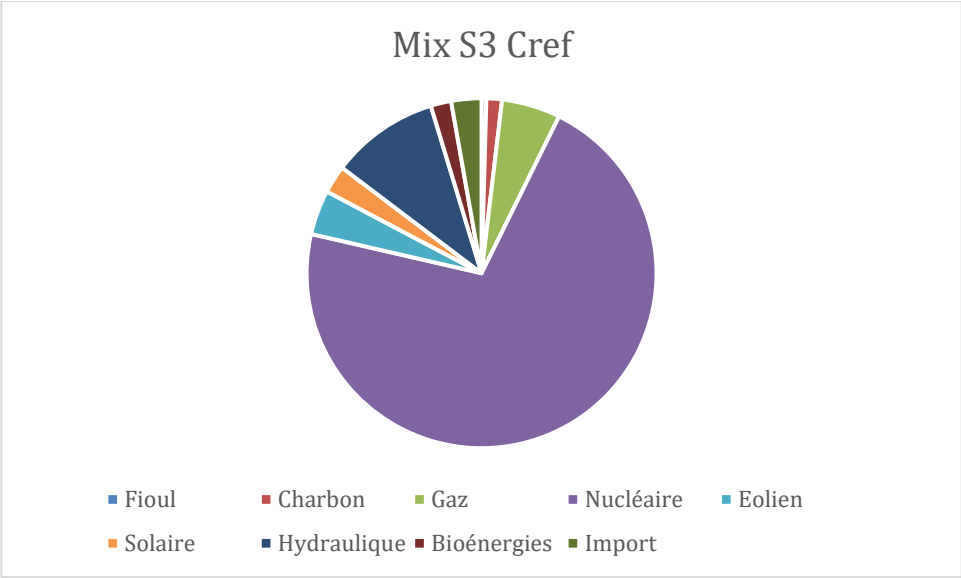


Figure 4-29 : Mix électrique du groupe froid dans le scénario S3-Cref

4.5.2.3 *Qualité des données*

Tableau 4-14 : Qualité des données pour le S3-Cref

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Réseau de froid									
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Pont roulant 25m 16T					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommation gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.5.3 S3-Dref : Groupe froid à compression sur air de petite puissance

4.5.3.1 Inventaire matière

10 groupes froids aérothermie de 100 kW et d'une durée de vie de 15 ans :

Masse (par groupe froid)	Source
1800 kg	Hypothèses Tractebel basées sur la documentation de Viessmann [31] (page 4)

Les groupes froids sont chargés de 90 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent en PC. La quantification est réalisée par Tractebel. Le tout a été multiplié par le nombre de logements, i.e. 10.

Un transformateur d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
17 kg	Estimations Tractebel

4.5.3.2 Inventaires énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S3-Dréf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en froid client	kWh th	2 703 260
Production de froid	kWh th	2 703 260
Consommation équipement thermodynamique	kWh elec	1 025 470
EER groupe froid compression		2,6

L'histogramme de la production de froid des groupes froids à compression individuels dans le scénario S3-Dréf est présenté ci-dessous :

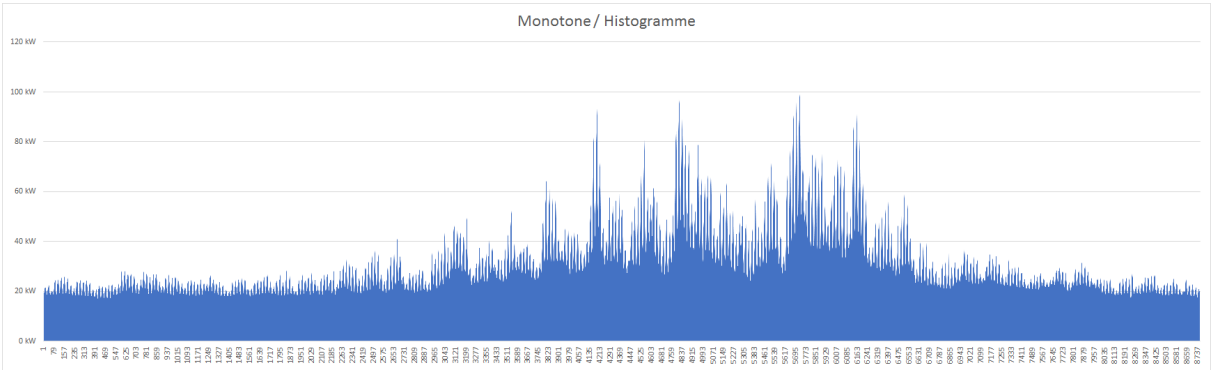


Figure 4-30 : Histogramme de production de chaleur des groupes froids individuels dans le scénario S3-Dref

En termes de consommation, les groupes froids individuels consomment 1 GWh d'électricité. Le mix électrique dynamique spécifique des groupes froids individuels est présenté ci-dessous :

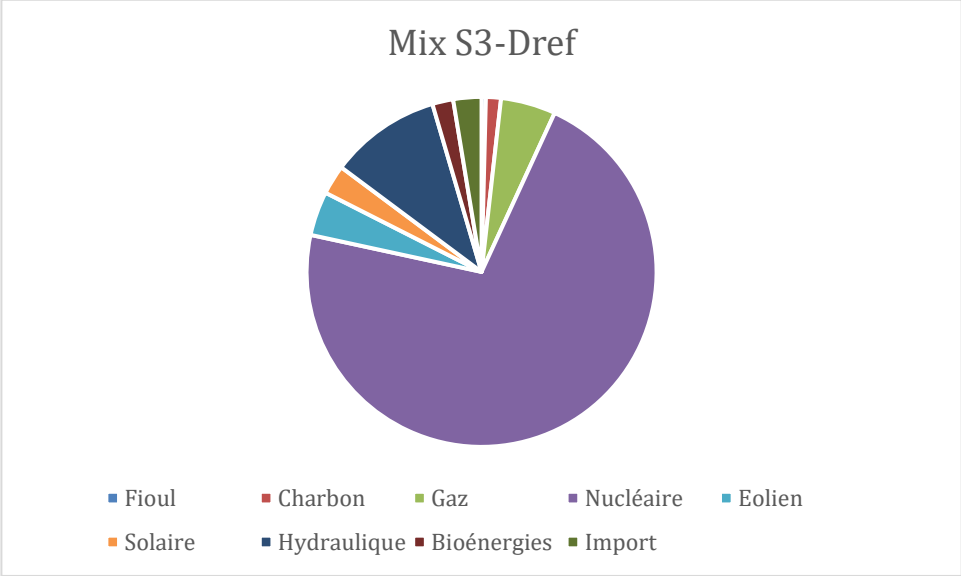


Figure 31 : Mix électrique des groupes froids individuels dans le scénario S3-Cref

4.5.3.3 Qualité des données

Tableau 4-15 : Qualité des données pour le S3-Dref

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Transformateur					
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Packaging					Quantité générique de packaging
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en
	Transformateur				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Fuites de réfrigérant à l'installation				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Packaging				
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies. Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.6 Cas d'étude 4

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 4 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1

4.6.1 S4-RC : Centrale solaire thermique

4.6.1.1 Inventaire matière

Les données suivantes représentent un « équivalent Drake Landing ». Elles ont été multipliées par 5,4 pour atteindre la puissance nécessaire au besoin défini (voir § 3.6.2.1) :

1 chaudière de grande puissance d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
1 100 kg	Chaudière de 608 kW sortie de la modélisation TRNSYS approximée par les règles de masse / puissance [28]

8 pompes d'une durée de vie de 10 ans (dont 3 pompes pour le réseau) :

Masse (par pompe)	Source
200 kg	Simulation TRNSYS et extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]

150 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale (pour l'ensemble des Drake Landing)	Source
110 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Un réseau de chaleur de 2 000 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
4,18 kg de PE	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 910 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.
1,08 kg de PU	

108 sondes de 35 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
13,7 g de fer	Simulation TRNSYS

1 362 raccordements de sondes d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 raccordement)	Source
2,8 kg d'acier	Simulation TRNSYS

108 forages de 35 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
106 litres de diesel	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)
64,7 kg de bentonite activée	

1 circuit primaire solaire thermique (des capteurs aux circuits secondaires) d'une longueur de 1 200 m et d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
90 kg d'acier	Simulation TRNSYS
4 kg de PU	

1 circuit secondaire solaire thermique (des circuits secondaires aux stockages) d'une longueur de 578 m et d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
177 kg d'acier	Simulation TRNSYS
5,7 kg de PU	

Du glycol d'une durée de vie de 10 ans :

Masse totale	Source
2 041 kg	Simulations TRNSYS

84 capteurs solaires thermiques plan grande puissance d'une durée de vie de 50 ans :

Surface (m²)	Source
16	Simulations Drake Landing TRNSYS

38 capteurs solaires thermiques plan de petite puissance d'une durée de vie de 50 ans :

Surface (m²)	Source
2,16	Basé sur la fiche PEP des capteurs collectifs [22]

20 chaudières individuelles de 7kW d'une durée de vie de 22 ans :

Masse totale (par chaudière)	Source
13 kg	Basé sur la fiche PEP d'une chaudière [28]

20 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
173 kg	La masse et la composition matière se base sur les modèles BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

2 ballons tampons d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par ballon)	Source
51 732 kg	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

20 ballons tampons individuels d'une durée de vie de 22 ans :

Masse (par ballon)	Source
1 768 kg	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

2 transformateurs d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
890 kg (par transformateur)	Fiche technique de Cahors [36] (page 159, modèle de puissance 250 kVA)

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
400 m²	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.6.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S4-RC lors de la dixième année de fonctionnement :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaud client – chaleur + ECS	kWh th	4 700 000
Production de chaud client - chaleur	kWh th	3 840 005
Production de chaud client - ECS	kWh th	1 143 180
Consommation de complément gaz - chaleur	kWh th	508 080
Consommation de complément gaz - ECS	kWh th	225 045
Consommation des différentes pompes du circuit	kWh elec	144 796
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	149 019
Taux EnR&R injecté dans le réseau		84 %

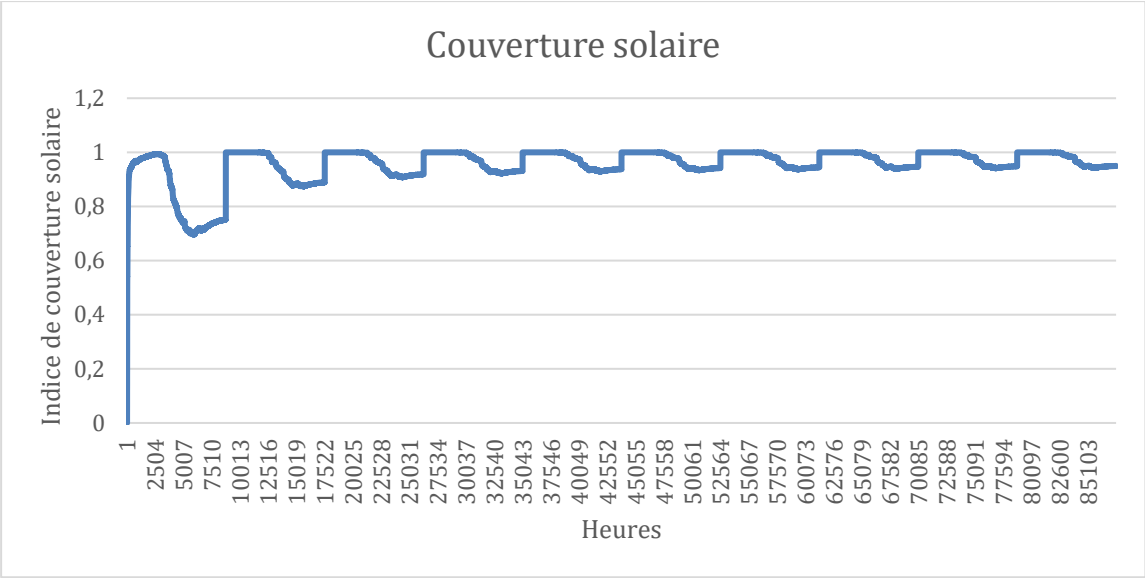


Figure 4-32 - Evolution de la couverture solaire avec le temps pendant 10 ans pour le scénario S4-RC

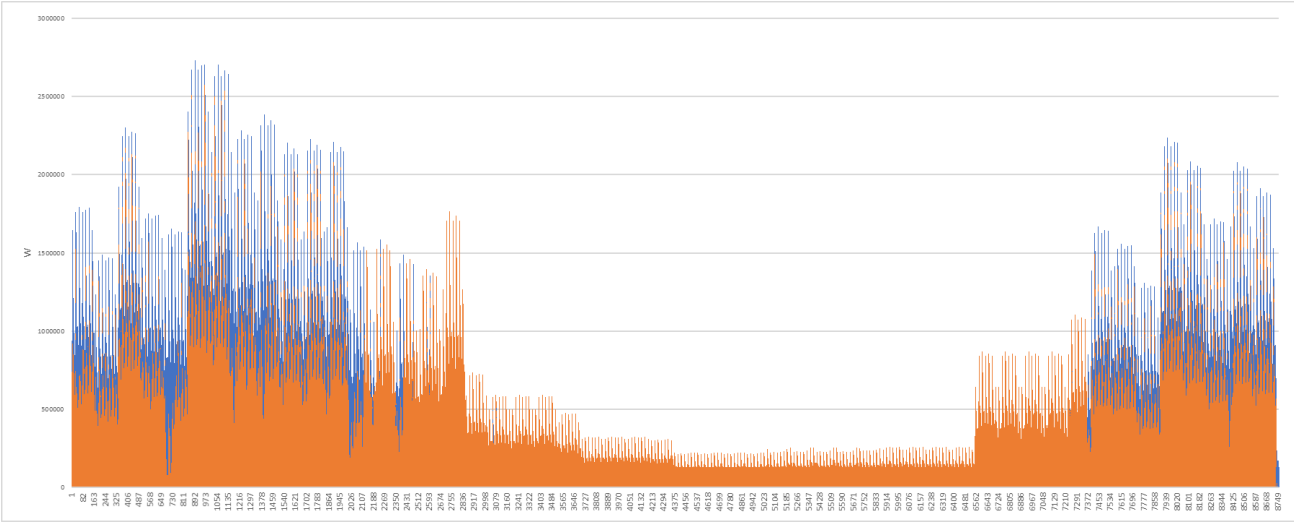


Figure 4-33 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-RC (orange = production solaire et bleu = complément gaz)

4.6.1.3 Qualité des données

Tableau 4-16 : Qualité des données pour le S4-RC

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompes réseau primaire					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes réseau de chaleur					Les données ont été simulées sous TRNSYS				
	Circuit primaire (des capteurs au circuit secondaire)									
	Circuit secondaire (du circuit primaire aux stockages)									
	Génie civil					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Pont roulant									
	Cheminée									
	Cables électriques									
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes de 35 m					Les données ont été simulées sous TRNSYS				
	Raccordement entre sondes									
	Panneaux solaires pour réseau									Issues de données fournisseurs
	Glycol									Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière grande puissance									
	Stockage intermédiaire (ballon)									
	Chaudière individuelle					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Panneaux solaires pour ECS									Issues de PEP Ecopassport
	Stockage individuel (ballon)									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Forage					Consommation au forage extrapolée				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies sur la base du modèle TRNSYS. Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Toutes ces estimations proviennent d'une adaptation d'un modèle canadien à un modèle français sur des principes purement techniques issus de la modélisation TRNSYS : ces valeurs sont donc incertaines et théoriques.

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.6.2 S4-Créf : Chaudière gaz

4.6.2.1 Inventaire matière

3 chaudières d' 1,4 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
2 600 kg	Chaudière Viessman Vitomax de taille 4 [24]

3 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
200 kg	Fiche technique Grundfoss [32]

10 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
89,6 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
10 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Un réseau de chaleur de 2 000 m d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
4,18 kg de PE	L'estimatif a été réalisé par Tractebel avec des masses volumiques pour le pour le PE et la mousse PU de 910 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.
1,08 kg de PU	

20 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour 1 sous station)	Source
133 kg	La masse et la composition matière se base sur les modèles BH 60 H – 16 D d'Unical [42]

2 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par ballon)	Source
672 kg	Basée sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
400 m²	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.6.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S4-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	4 745 891
Production de chaleur	kWh th	4 983 185
Consommation en gaz naturel	kWh (PCI)	5 061 181
Consommation électrique des pompes	kWh élec	149 019
Rendement		98,5 %

L'histogramme de production de la chaudière est présenté ci-dessous :

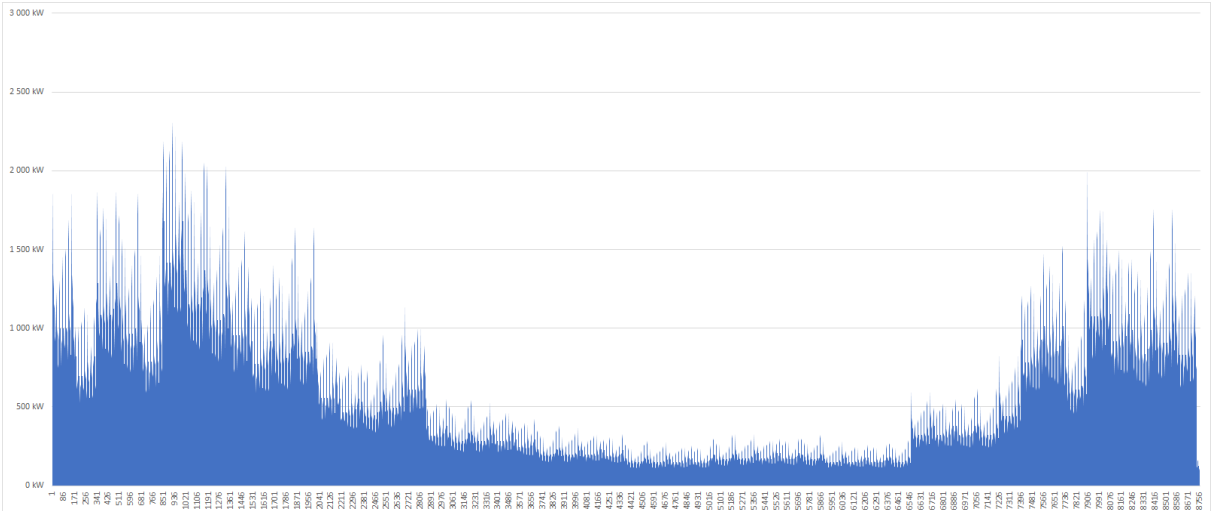


Figure 4-34 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-Créf

Dans ce scénario, on estime une consommation de gaz naturel pour la chaudière de 5 GWh.

4.6.2.3 Qualité des données

Tableau 4-17 : Qualité des données pour le S4-Cref

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Réseau de Chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Sous-station									
	Ballon tampon									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminée									
	Pont roulant 25m 16T									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.6.3 S4-Dréf 1 : Chaudières gaz individuelles

Les inventaires matière et énergie sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

4.6.3.1 Inventaire matière

20 chaudières de 130 kW d'une durée de vie de 22 ans :

Masse	Source
235 kg	Basé sur la fiche PEP d'une chaudière [28]

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4.6.3.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S4-Dréf 1 :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	4 745 891
Production de chaleur	kWh th	4 745 891
Consommation en gaz naturel	kWh (PCI)	5 329 300
Rendement		89,1 %

L'histogramme de production de la chaudière est présenté ci-dessous :

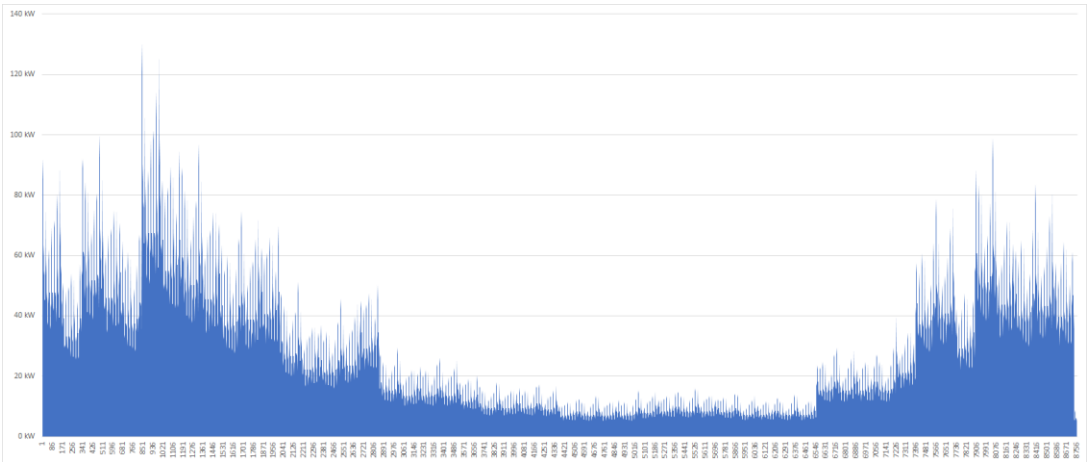


Figure 4-35 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S4-Dréf 1

Dans ce scénario, on estime une consommation de gaz naturel pour la chaudière de 5,3 GWh.

4.6.3.3 *Qualité des données*

Tableau 4-18 : Qualité des données pour le S4-Dref1

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.6.4 S4-Dréf 2 : Centrales solaires thermiques individuels

Les inventaires matière et énergie sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

4.6.4.1 Inventaire matière

L'inventaire est donné pour un bâtiment et doit donc être multiplié par 20 pour comptabiliser l'ensemble des installations de ce scénario.

150 m² de capteurs solaires plan de petite puissance, d'une durée de vie de 50 ans :

Surface (m²)	Source
2,16	Basé sur la fiche PEP des capteurs collectifs [22]

255 m de tubes d'une durée de vie de 20 ans :

Masse	Source
38 kg	Calcul réalisé par Tractebel avec une masse volumique de 8 000 kg/m^3 pour l'acier de 140 kg/m^3 pour l'isolant.

Pour l'ensemble du quartier, 4 ballons tampons de 2 000 litres d'une durée de vie de 22 ans :

Masse (par ballon)	Source
862 kg	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

Un antigel composé de glycol avec une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
2 713 kg	Estimation réalisée par Tractebel

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

20 chaudières de 130 kW d'une durée de vie de 22 ans :

Masse	Source
235 kg	Basé sur la fiche PEP d'une chaudière [28]

4.6.4.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S4-Dréf 2 :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	4 745 891
Production de chaleur	kWh th	4 745 891
Consommation en gaz naturel	kWh (PCI)	3 390 880
Rendement chaudière		89,1 %

L’histogramme de production de la chaudière est présenté ci-dessous :

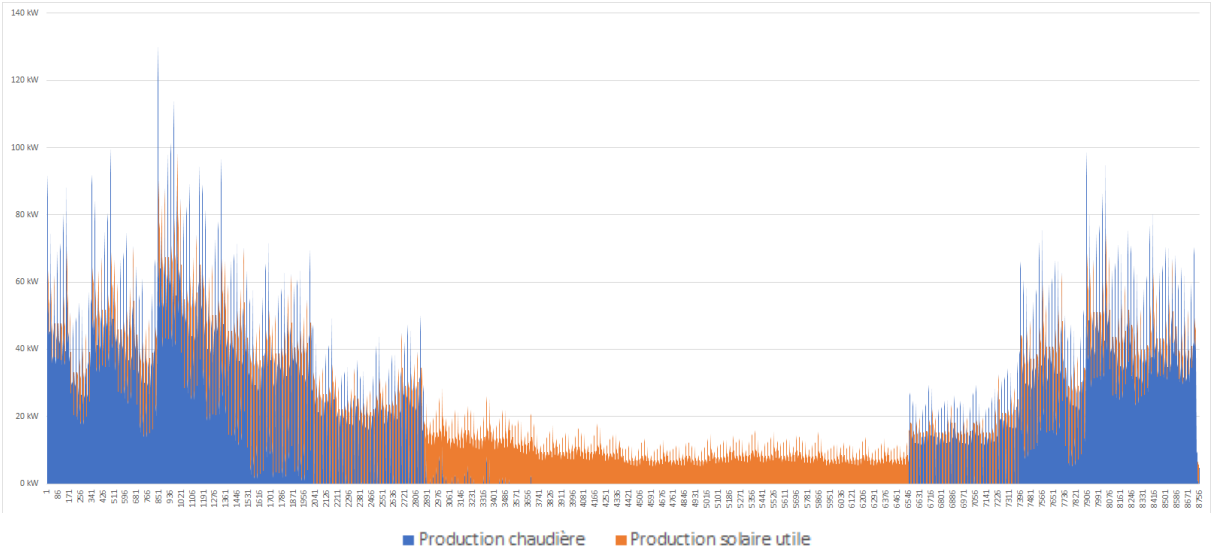


Figure 4-36 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-Dréf 2

Dans ce scénario, on estime une consommation de gaz naturel pour la chaudière de 3,4 GWh. Le reste de la demande est fourni par des panneaux solaires.

4.6.4.3 *Qualité des données*

Tableau 4-19 : Qualité des données pour le S4-Dref2

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement.
	Panneaux solaires									PEP Ecopassport
	Ballon de stockage									
	Glycol									Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.7 Cas d'étude 5

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 5 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.7.1 S5-R : Groupe froid à absorption Eau/Bromure de lithium

4.7.1.1 Inventaire matière

1 groupe froid à absorption Eau/LiBr de 2MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
20 000 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Thermax [50] page 8 modèle ED 40C THU

Le groupe froid est chargé de 1200 kg de réfrigérant Eau/LiBr (estimatif Tractebel).

5 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
300 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]

15 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
10 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

20 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour une sonde)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel.

600 raccordements à la nappe d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60m :

Composition	Source
182 litres de diesel par forage	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)

2 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans et d'une capacité de 4 000L :

Masse par ballon	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.7.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S5-R :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en froid client	kWh th	14 796 801
Production de froid	kWh th	14 796 801
Consommation électrique équipements thermodynamiques	kWh elec	24 088
Consommation chaleur fatale	kWh th	25 459 278
Consommation électrique pompe	kWh elec	530 986
EER		0.58
Taux EnR&R injecté dans le réseau		99,8 %

L'histogramme de production du groupe froid à absorption est présenté ci-dessous :

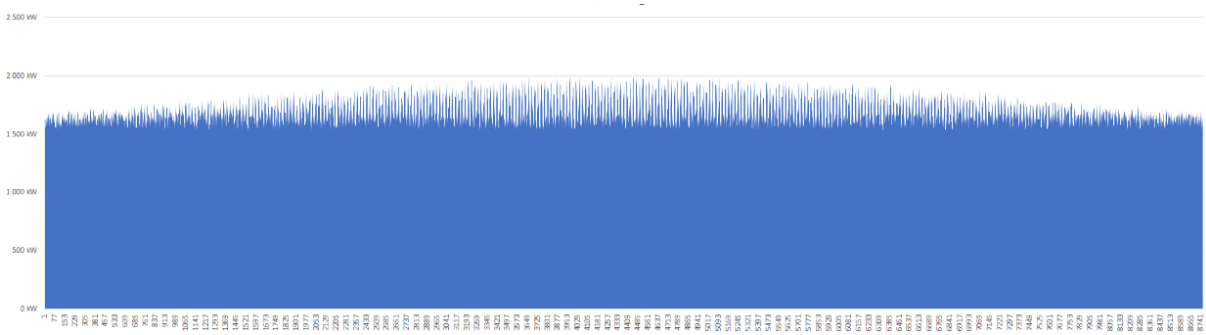


Figure 4-37 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S5-R

En termes de consommation, le groupe froid à absorption consomme 22 MWh d'électricité tandis que les pompes de réseau ont une consommation électrique de 531 MWh.

4.7.1.3 Qualité des données

Tableau 4-20 : Qualité des données pour le S5-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid absorption					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Ballon tampon									
	Pont roulant 25m 16T					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommation chaleur fatale					Calcul pour la technologie spécifiée				La chaleur est considérée comme gratuite
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.7.2 S5-Créf : Groupe froid à compression sur nappe phréatique

4.7.2.1 Inventaire matière

1 groupe froid à compression de 2 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
11 000 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Carrier [30], page 6 modèle 6060

Le groupe froid est chargé de 180 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

4 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
300 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique Grundfoss [32]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

1 transformateur d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
890 kg	Fiche technique de Cahors [36] (page 159, modèle de puissance 250 kVA)

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
10 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents. La quantification est réalisée par Tractebel.

20 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour une sonde)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel

600 raccordements à la nappe d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60m :

Composition	Source

182 litres de diesel par forage	Une extrapolation a été réalisée à partir de la quantité de carburant nécessaire pour un forage de 200 m [47] (page 98)

2 ballons tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par ballon)	Source
862 kg	La capacité des ballons tampon a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.7.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S5-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en froid client	kWh th	14 796 801
Production de froid	kWh th	14 796 801
Consommation électrique équipements thermodynamiques	kWh elec	2 031 022
Consommation électrique pompe	kWh elec	530 986
EER		7,3
Taux EnR&R injecté dans le réseau		86 %

L'histogramme de production du groupe froid est présenté ci-dessous :

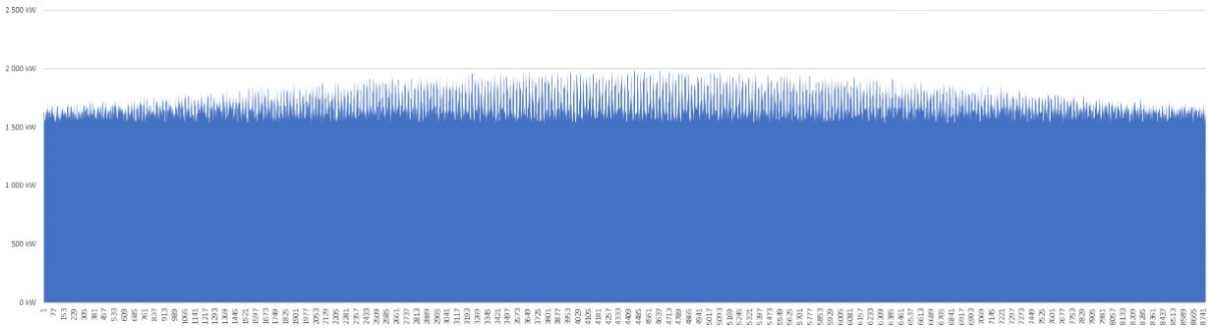


Figure 4-38 : Histogramme de production de froid pour le scénario S5-Créf

En termes de consommation, le groupe froid à compression consomme plus de 2 GWh tandis que les pompes du réseau ont une consommation électrique de 531 MWh

4.7.2.3 Qualité des données

Tableau 4-21 : Qualité des données pour le S5-Cref

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Groupe froid compression					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Ballon tampon									
	Pont roulant 25m 16T					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.8 Cas d'étude 6

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 6 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.8.1 S6-R : Pompe à chaleur à ammoniac sur nappe phréatique

4.8.1.1 Inventaire matière

1 pompe à chaleur ammoniac de 250 kW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
1 480 kg	Donnée Tractebel recueillie auprès d'un expert

La pompe à chaleur est chargée de 15 kg de réfrigérant Eau/Ammoniac (estimatif Tractebel).

3 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
30 kg	Fiche technique Grundfoss [35]

10 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
5 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 1 équivalent en PC dont la quantification est réalisée par Tractebel.

2 sondes de 60 m d'une durée de vie de 50 ans :

Composition (pour une sonde)	Source
110 kg	La quantité est un estimatif réalisé par Tractebel

30 raccordements à la nappe d'une durée de 50 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
6,57 kg	Expertise Tractebel

Une consommation de gazole pour chaque forage de 60m :

Composition	Source

182 litres de diesel par forage	L'estimatif a été réalisé par Tractebel

2 ballons tampons d'une durée de vie de 50 ans :

Masse (par ballon)	Source
431 kg	La capacité des ballons tampons a été estimée par Tractebel. La masse a ensuite été extrapolée à partir de la fiche PEP [21]

4.8.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S6-R :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	1 781 782
Production de chaleur	kWh th	1 781 782
Consommation électrique équipements thermodynamiques	kWh elec	253 390
Consommation électrique pompe	kWh elec	15 985
EER		7
Taux EnR&R injecté dans le réseau		86 %

L'histogramme de production de chaleur de la PAC est présenté ci-dessous :

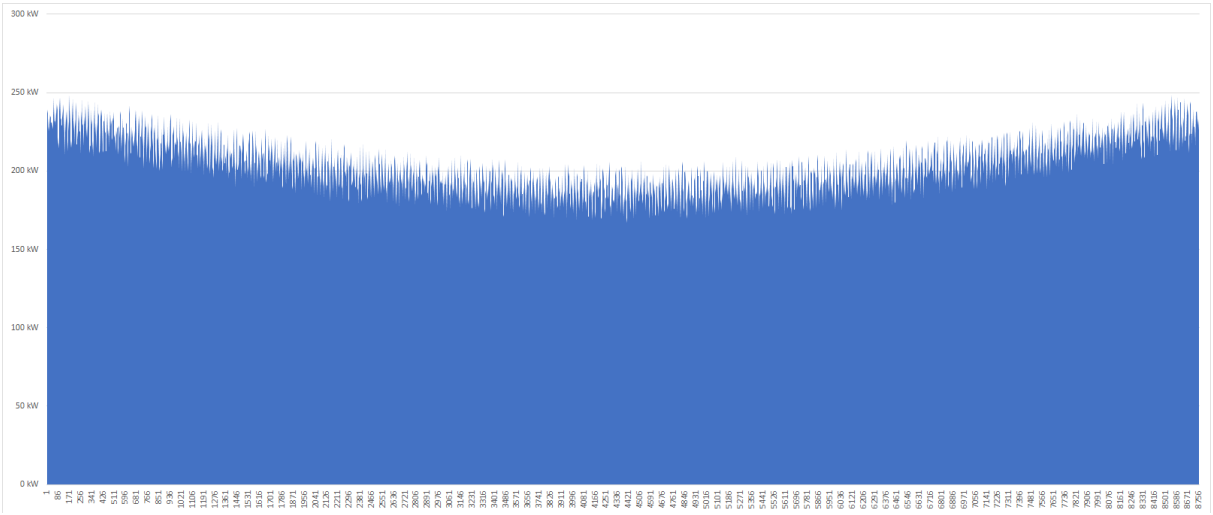


Figure 4-39 : Histogramme de production de chaleur de la PAC du scénario S6-R

La consommation électrique de la pompe à chaleur est de 253 MWh tandis que les pompes du réseau ont une consommation de 16 MWh.

4.8.1.3 *Qualité des données*

Tableau 4-22 : Qualité des données pour le S6-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	PAC ammoniac					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Equipements électriques									
	Sondes 60m					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Raccordement à la nappe									
	Ballon tampon									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Sondes					Consommation de forage extrapolée				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3). Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.8.2 S6-Créf : Chaudière gaz

4.8.2.1 Inventaire matière

1 chaudière de 250 kW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
364 kg	Fiche technique de De Dietrich [48]

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
30 kg	Fiche technique Grundfoss [35]

La régulation est modélisée par 0.5 équivalent en PC dont la quantification est réalisée par Tractebel.

4.8.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S6-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	1 781 782
Production de chaleur	kWh th	1 781 782
Consommation en gaz naturel	kWh (PCI)	1 773 810
Consommation électrique pompe	kWh elec	5 302
Rendement		100 %

L'histogramme de production de la chaudière est présenté ci-dessous :

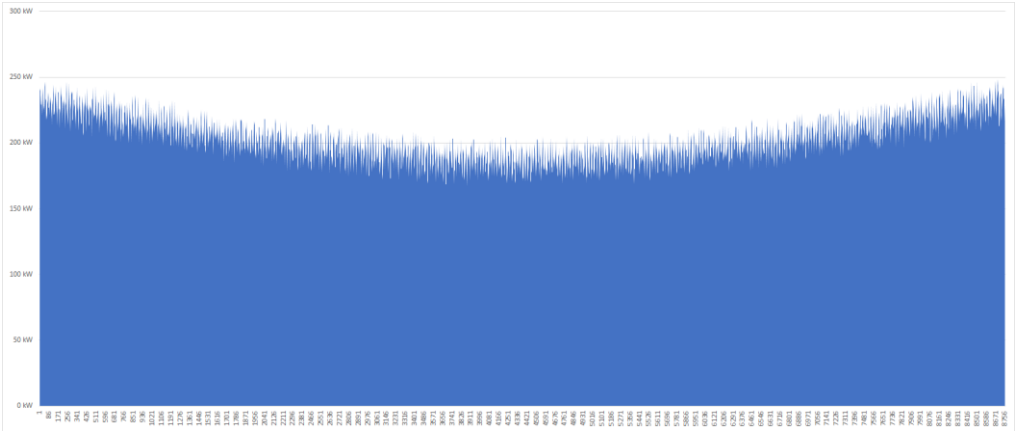


Figure 4-40 : Histogramme de production de chaleur de la chaudière gaz du scénario S6-Créf

Dans le scénario S6-Créf, la chaudière consomme 1,8 GWh de gaz naturel.

4.8.2.3 Qualité des données

Tableau 4-23 : Qualité des données pour le S6-Créf

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompe									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.9 Cas d'étude 7

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 7 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.9.1 S7-R : Pompe à chaleur absorption/compression

4.9.1.1 Inventaire matière

1 pompe à chaleur hybride de 1,7 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
10 470 kg	Donnée Tractebel récoltée auprès d'un expert

La pompe à chaleur est chargée de 700 kg de réfrigérant Ammoniac/Eau (estimatif Tractebel).

5 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
600 kg	Fiche technique Grundfos [51]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
5,376 kg de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
300 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 transformateur d'une durée de vie de 25 ans

Masse	Source
2 900 kg	Extrapolation à partir de la fiche technique de Cahors [36]

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.9.1.2 *Inventaire énergie*

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S7-R :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	12 024 613
Production de chaleur	kWh th	12 024 613
Consommation électrique éléments thermodynamiques	kWh élec	2 672 136
Consommation énergie fatale	kWh th	9 352 476
COP		4,5
Taux EnR&R injecté dans le réseau		78 %

L'histogramme de production de la pompe à chaleur hybride est présenté ci-dessous :

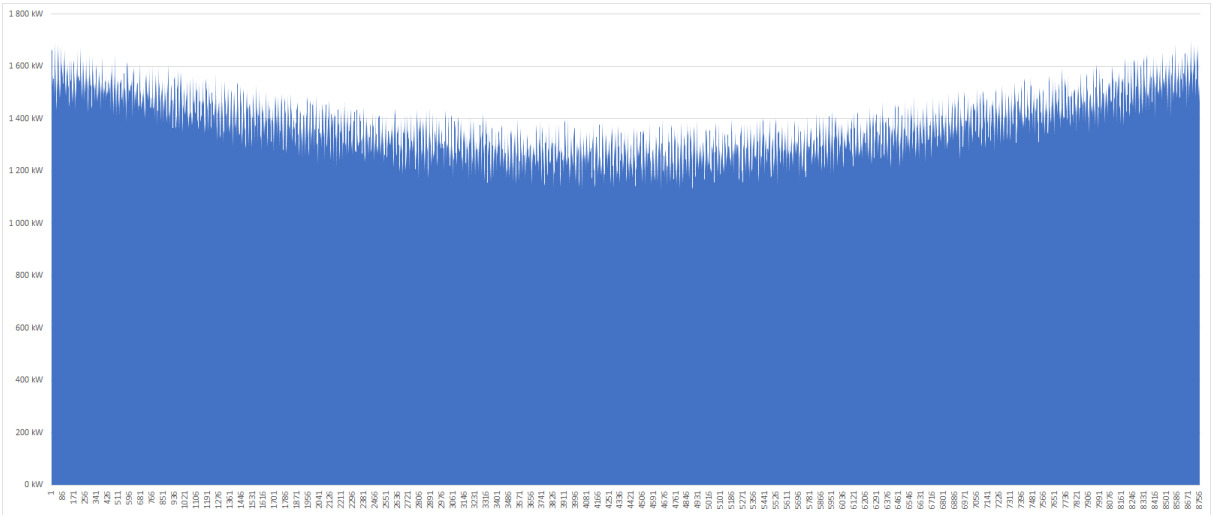


Figure 4-41 : Histogramme de production de chaleur de la PAC dans le scénario S7-R

Pour répondre au besoin de chaleur du client, une consommation électrique de 2,7 GWh et une consommation en énergie fatale de 9,3 GWh sont nécessaires.

4.9.1.3 *Qualité des données*

Tableau 4-24 : Qualité des données pour le S7-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	PAC hybride					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Equipements électriques									
	Transformateur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
	Pont roulant									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommation chaleur fatale					Calcul pour la technologie spécifiée				La chaleur est considérée comme gratuite
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3). Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.9.2 S7- Créf : Chaudière gaz

4.9.2.1 Inventaire matière

1 chaudière de 1,7 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
2 600 kg	Fiche technique Viessmann [24]

La régulation est modélisée par 0.5 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4.9.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S7-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	12 024 613
Production de chaleur	kWh th	12 024 613
Consommation en gaz naturel	kWh PCI	12 417 501
Rendement		97,1%

L'histogramme de production de la chaudière est présenté ci-dessous :

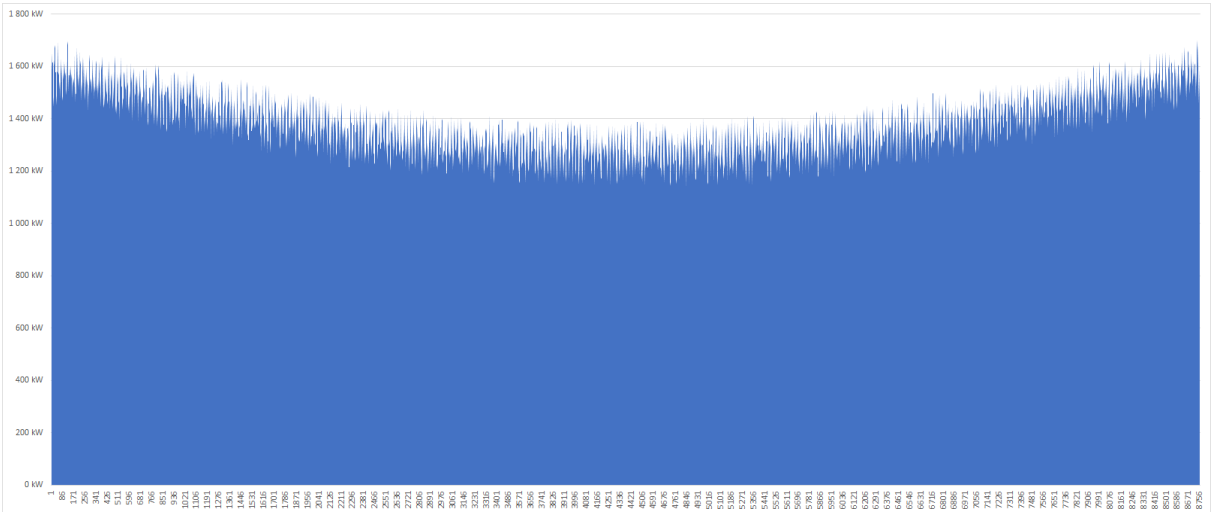


Figure 4-42 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S7-Créf

Pour répondre au besoin de chaleur du client, une consommation électrique de 12 GWh de gaz naturel sera nécessaire.

4.9.2.3 Qualité des données

Tableau 4-25 : Qualité des données pour le S7-Créf

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.10 Cas d'étude 8

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 8 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.10.1 Scénario S8-R : Thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante

4.10.1.1 Inventaire matière

1 thermo-frigo-pompe de 800 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
5 650 kg	Données récoltées par Tractebel auprès d'un expert AXIMA

La pompe à chaleur est chargée de 15 kg de réfrigérant Eau/Ammoniac (données récoltées AXIMA).

1 tour aéroréfrigérante de 900 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
5 370 kg	Fiche technique Jacir [44], modèle TM9 E09 S3 10622

1 stockage d'eau chaude d'une durée de vie de 50 ans :

Volume	Source
200 m^3	Données récoltées par Tractebel auprès d'un expert AXIMA

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
522 kg	Fiche technique Grundfos [34]

10 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
5 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 1 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4.10.1.2 *Inventaire énergie*

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S8-R :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	3 854 400
Production de chaleur	kWh th	3 854 400
Besoin en froid client	kWh th	5 748 310
Production en froid client	kWh th	5 748 310
Consommation électrique TFP	kWh élec	1 579 152
Consommation électrique des pompes	kWh élec	183 064
Taux EnR&R injecté dans le réseau		84 %

Les histogrammes de production de chaleur et de froid de la TFP sont présentés ci-dessous.

Le besoin de chaleur est principalement nocturne, parce que le lavage des lignes de production agroalimentaire est effectué à l'eau chaude, principalement effectué la nuit.

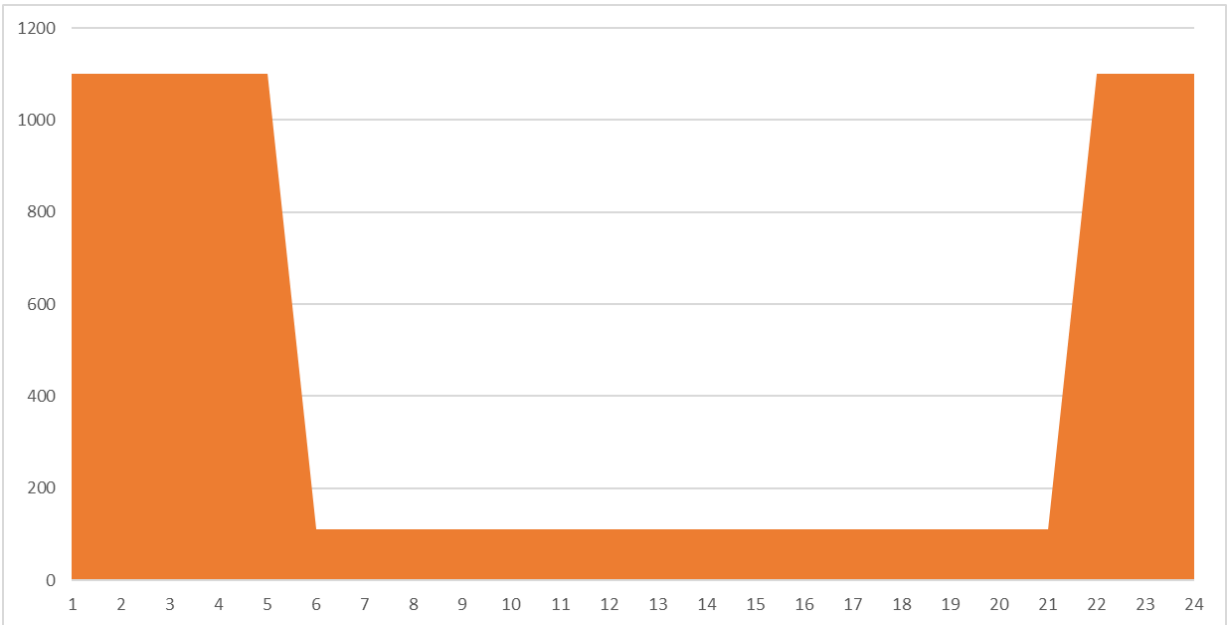


Figure 4-43 : Histogramme de production de la chaleur de la TFP dans le scénario S8-R d'une journée type

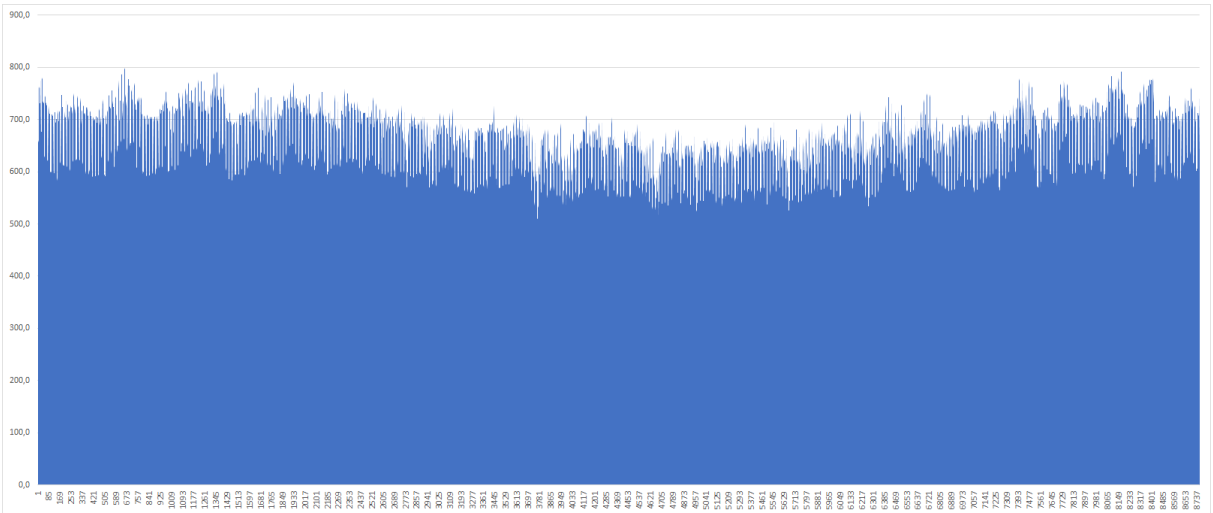


Figure 4-44 : Histogramme de production de froid de la TFP dans le scénario S8-R

La TFP aura une consommation électrique d'environ 1,6 GWh d'électricité pour répondre aux besoins de chaud et de froid de l'installation.

Le cas d'étude 8 est le seul cas d'étude pour lequel le mix électrique consommé par un équipement thermodynamique sera modélisé de manière dynamique et non moyenne annuelle. D'une part, le rythme 2*8 en production à 100% et 1*8 en production réduite (nettoyage ligne par ligne de la production) provoque des variations journalières. Et les variations saisonnières attendues sont dues au fait que la climatisation du bâtiment dépend des charges thermiques du procédé (chaleur des moteurs, réaction exothermique, occupation) mais aussi des conditions extérieures (renouvellement d'air, température extérieure).

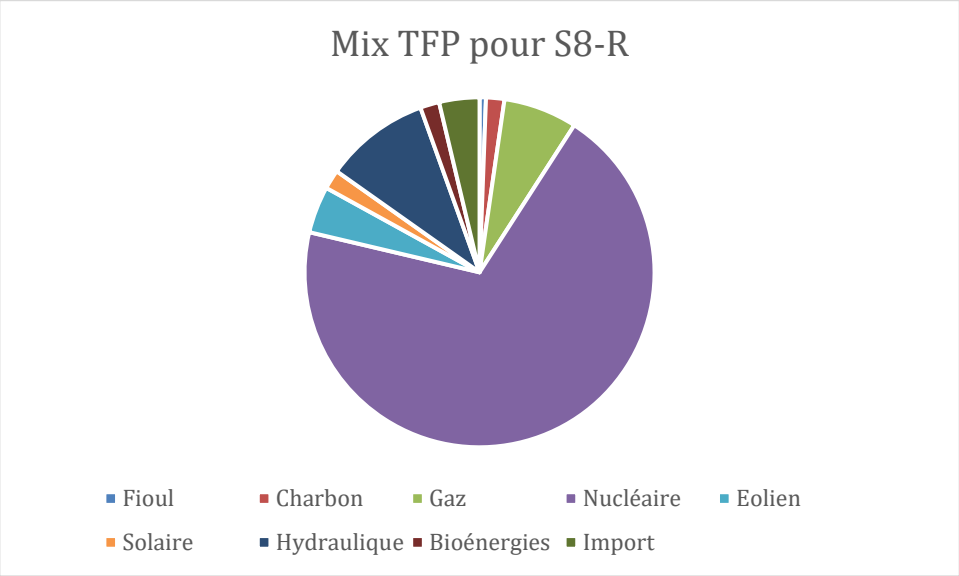


Figure 4-45 : Mix électrique spécifique pour la TFP du scénario S8-R

4.10.1.3 Qualité des données

Tableau 4-26 : Qualité des données pour le S8-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Thermo-frigo-pompe					Les quantités ont été estimées à partir d'un projet spécifique				Les données matières ont été cestimées sur la base du projet spécifique.
	Tour aéro-réfrigérante									
	Pompes									
	Stockage d'eau chaude									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Transformateur									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électricité					Donnée issue d'un projet spécifique				Mix français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et d'équipements réels.
- Les masses de ces équipements sont directement liées à un projet réel

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3). Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.10.2 S8-Créf : Chaudière et gaz et groupe froid ammoniac

4.10.2.1 Inventaire matière

1 groupe froid de 800 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
4 450 kg	Données récoltées par Tractebel auprès d'un expert AXIMA

Le groupe froid est chargé de 350 kg de réfrigérant Eau/Ammoniac (estimatif Tractebel).

1 chaudière de 1 100 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
4 482 kg	Hypothèses Tractebel basées sur la fiche technique Babcock [25] (modèle HW3P 1160)

1 tour aéroréfrigérante d'une puissance de 900 kW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
5 370 kg	Fiche technique Jacir [44], modèle TM9 E09 S3 10622

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
522 kg	Fiche technique Grundfos [34]

10 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse totale	Source
5 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 1 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4.10.2.2 Inventaire « énergie »

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S8-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	3 854 400
Production de chaleur	kWh th	3 854 400
Besoin en froid client	kWh th	5 748 310
Production en froid client	kWh th	5 748 310
Consommation électrique des éléments thermodynamiques	kWh élec	1 305 850
Consommation électrique des pompes	kWh élec	462 070

Paramètre	Unité	Valeur
Consommation en gaz naturel	KWh PCI	3 905 807
Taux EnR ADEME		46 %

Les histogrammes de production de chaleur et de froid sont présentés ci-dessous :

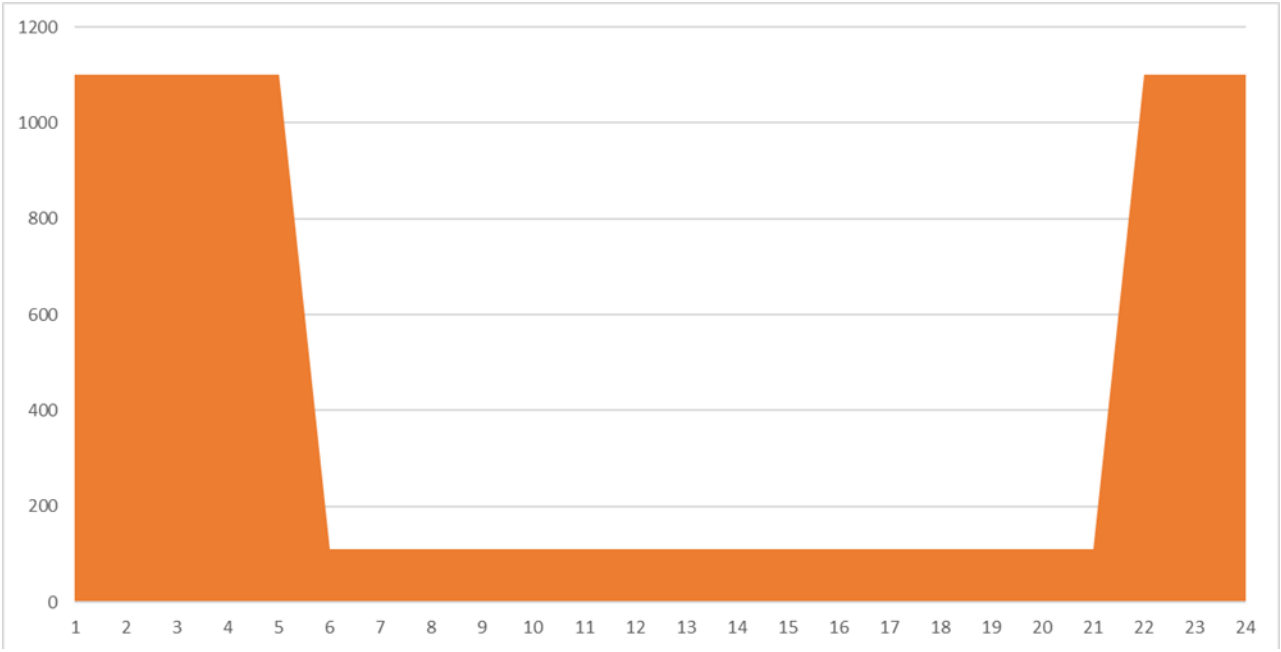


Figure 4-46 : Histogramme de production de chaleur de la chaudière dans le scénario S8-Créf d'une journée type

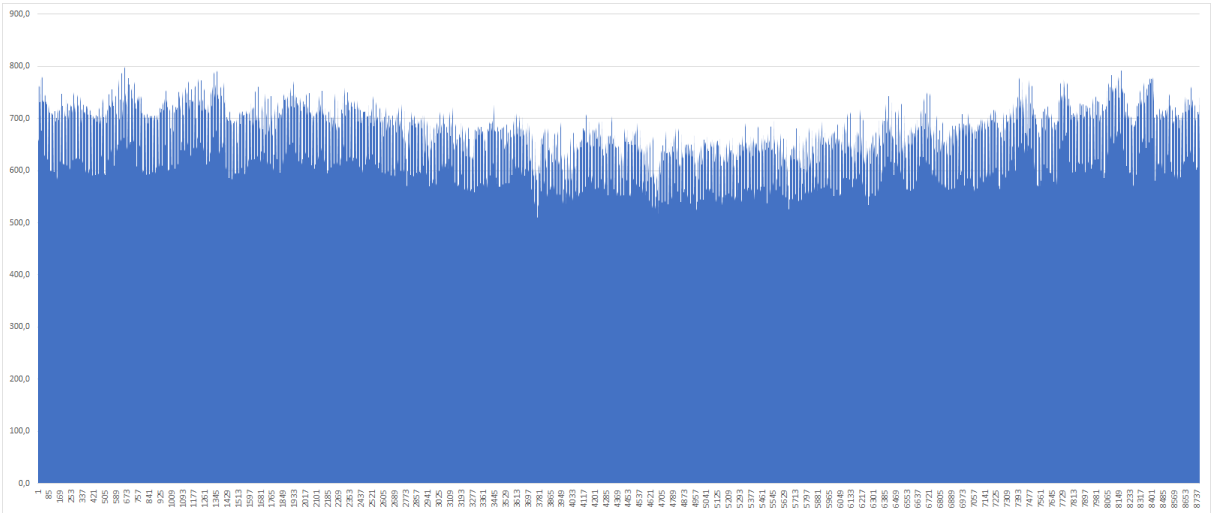


Figure 4-47 : Histogramme de production du groupe froid dans le scénario S8-Créf

Une consommation de gaz de 4 GWh et une consommation électrique de 1,3 GWh seront nécessaires dans ce scénario pour répondre aux besoins de chaud et de froid.

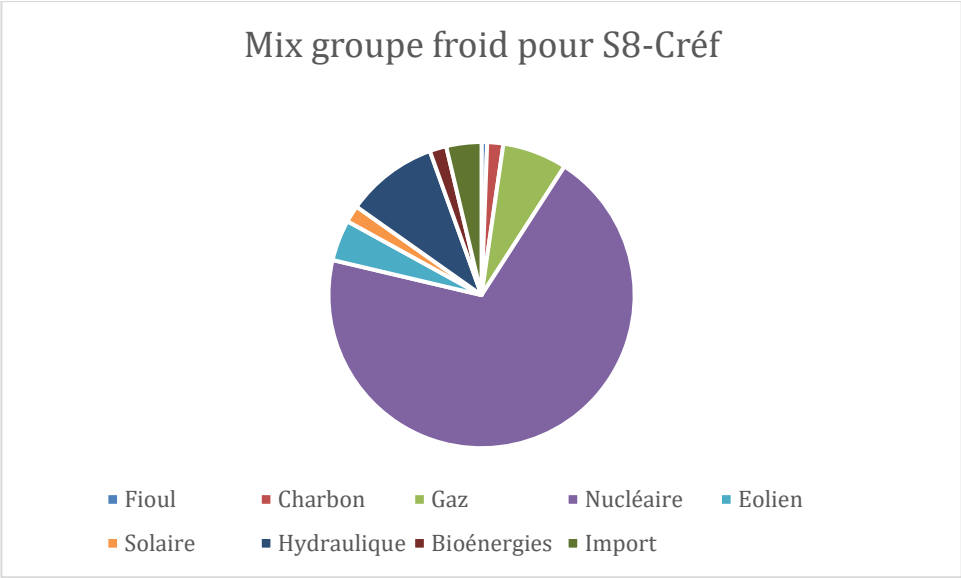


Figure 4-48 : Mix électrique spécifique du groupe froid dans le scénario S8-Créf

4.10.2.3 Qualité des données

Tableau 4-27 : Qualité des données pour le S8-Créf

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Groupe froid									
	Tour aéro-réfrigérante									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.11 Cas d'étude 9

Les inventaire matière et énergie pour les scénarios de l'étude de cas 9 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.11.1 S9-R : Centrale solaire thermique avec capteurs plans grande surface

4.11.1.1 Inventaire matière

1 chaudière de 2 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
3 700 kg	Fiche technique Viessmann [24]

576 capteurs solaires plan de grande puissance, d'une durée de vie de 60 ans

Masse (par panneau)	Source
503 kg	Estimatif réalisé par le CRIGEN à partir de la documentation d'un capteur Savosolar [23]

2 pompes d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
200 kg	Basé sur une fiche technique Grundfos [51]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents en PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 ballon tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
1 293 t	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.11.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S9-R :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	10 005 788
Production de chaleur	kWh th	10 005 788
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	4 794 962
Consommation électrique des pompes	kWh élec	79 791
Rendement chaudière		98,9%
Couverture solaire		53%

L'histogramme de production de chaleur est présenté ci-dessous :

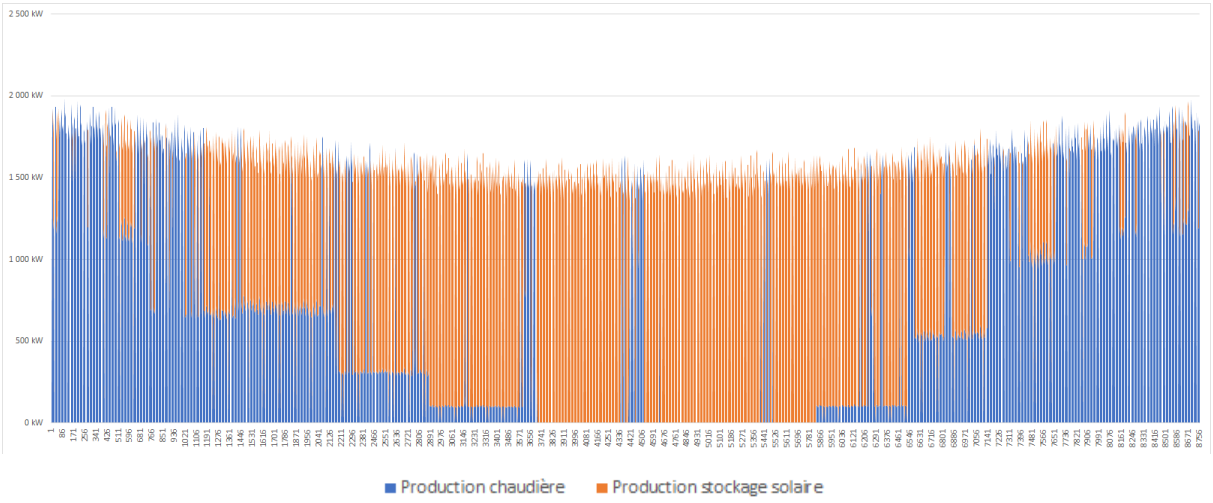


Figure 4-49 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, orange=solaire) pour le scénario S9-R

Pour répondre au besoin client, une consommation de 4,8 GWh de gaz naturel est nécessaire.

4.11.1.3 Qualité des données

Tableau 4-28 : Qualité des données pour le S9-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Cables électriques					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Panneaux solaires pour réseau					Les quantités ont été estimées à l'aide de fournisseurs sur la technologie particulière				Issues de données fournisseurs
	Stockage intermédiaire (ballon)									
	Glycol					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière grande puissance									
	Pont roulant									
	Cheminée									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Forage					Consommation au forage extrapolée				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et de simulations robustes de fournisseurs.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies par des simulations dynamiques TRNSYS de membres du comité technique. Elles sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes et approximées par des modèles robustes de fournisseurs solaires.

4.11.2 S9-Créf : Chaudière gaz

4.11.2.1 Inventaire matière

1 chaudière de 1,4 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
3 000 kg	Fiche technique Viessmann [24]

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
200 kg	Basé sur une fiche technique Grundfos [51]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 1 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 ballon tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
1 293 t	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.11.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S9-Créf :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	10 005 788
Production de chaleur	kWh th	10 005 788
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	10 116 968
Consommation électrique des pompes	kWh élec	19 948
Rendement chaudière		98,9%

L'histogramme de production de chaleur est présenté ci-dessous :

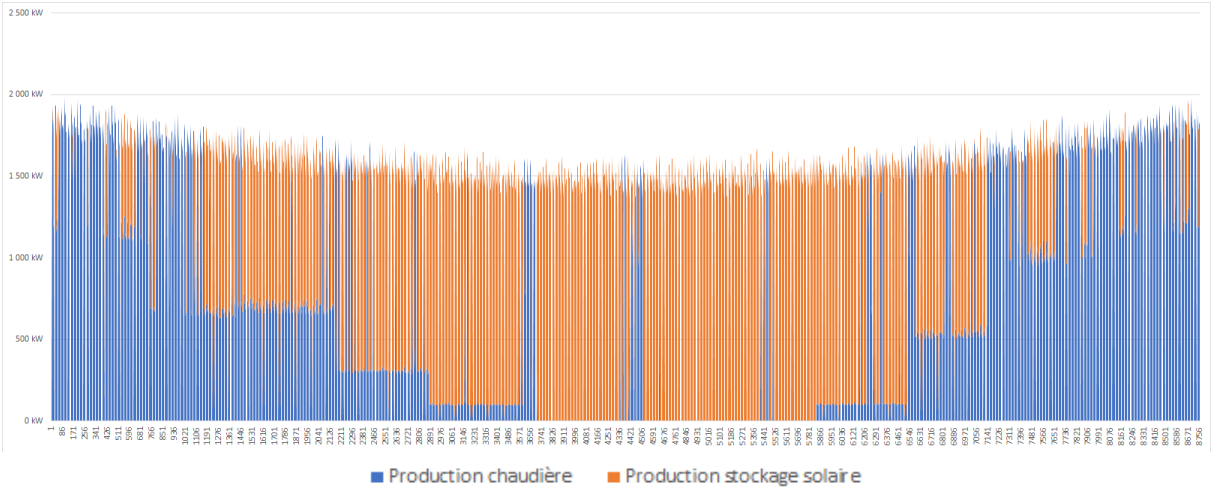


Figure 4-50 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, rouge=solaire) pour le scénario S9-Créf

Pour répondre au besoin client, une consommation de 10 GWh de gaz naturel est nécessaire.

4.11.2.3 Qualité des données

Tableau 4-29 : Qualité des données pour le S9-Créf

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Cables électriques					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Chaudière grande puissance									
	Pont roulant									
	Cheminée									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Forage					Consommation au forage extrapolée				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.12 Cas d'étude 10

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 10 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.12.1 S10-R : Panneaux solaires thermiques sous-vide

4.12.1.1 Inventaire matière

1 chaudière de puissance 1 MW d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
2 300 kg	Fiche technique Viessmann [24]

7 420 m² de panneaux solaires thermiques sous vide, d'une durée de vie de 60 ans :

Surface	Source
1 m²	Estimatif réalisé par le CRIGEN à partir de la base de données ecoinvent Evacuated tube collector {GB}| production | Cut-off, U

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
250 kg	Basé sur la fiche technique Grundfoss [32]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 ballon tampon d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
1 293 t	Basé sur la fiche PEP d'un ballon tampon [21]

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.12.1.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S10-R :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	5 002 894
Production de chaleur	kWh th	5 002 894
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	3 385 189
Consommation électrique des pompes	kWh élec	119 686
Rendement chaudière		95 %
Couverture solaire		35%

L'histogramme de production de chaleur est présenté ci-dessous :

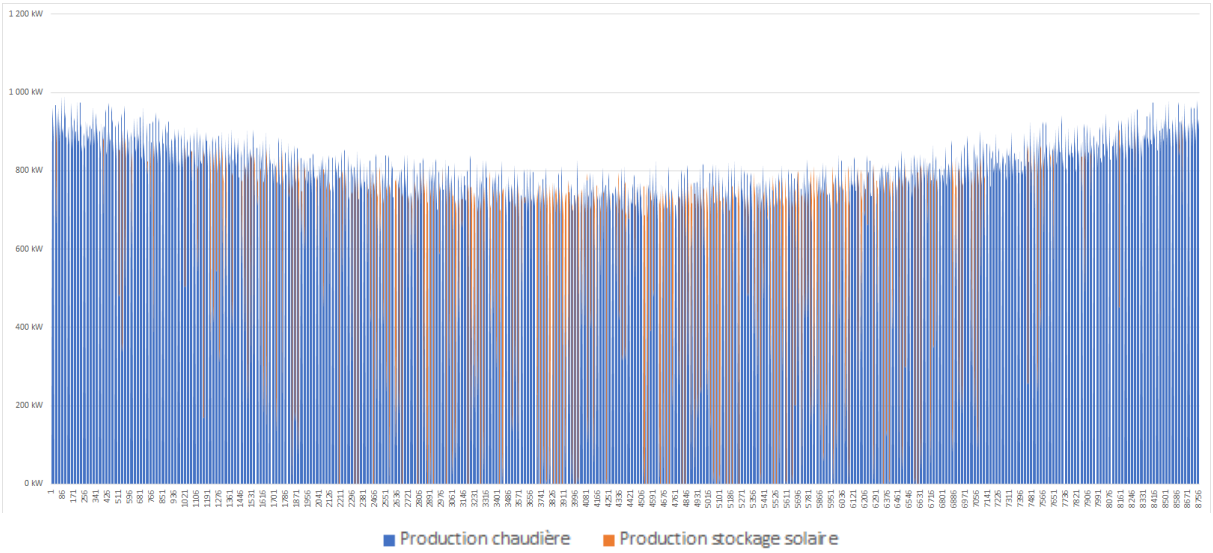


Figure 4-51 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, orange=solaire) pour le scénario S10-R

Une consommation de presque 3,3 GWh de gaz naturel est nécessaire pour faire l'appoint des panneaux solaires.

4.12.1.3 Qualité des données

Tableau 4-30 : Qualité des données pour le S10-R

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Cables électriques					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Panneaux solaires pour réseau					Les quantités ont été estimées à l'aide de fournisseurs sur la technologie particulière				Issues de données fournisseurs
	Stockage intermédiaire (ballon)									
	Glycol					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière grande puissance									
	Pont roulant									
	Cheminée									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Forage					Consommation au forage extrapolée				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et de simulations robustes de fournisseurs.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies par des simulations dynamiques TRNSYS de membres du comité technique. Elles sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes et approximées par des modèles robustes de fournisseurs solaires.

4.12.2 S10 Cref : Chaudière gaz

4.12.2.1 Inventaire matière

1 chaudière d'1 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
2 300 kg	Fiche technique Viessmann [24]

1 pompe d'une durée de vie de 10 ans :

Masse	Source
250 kg	Basé sur la fiche technique Grundfoss [32]

50 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
75 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.12.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S10-Créf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	5 002 894
Production de chaleur	kWh th	5 002 894
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	5 266 729
Consommation électrique des pompes	kWh élec	29 922
Rendement chaudière		95 %

L’histogramme de production de chaleur de la chaudière est présenté ci-dessous :

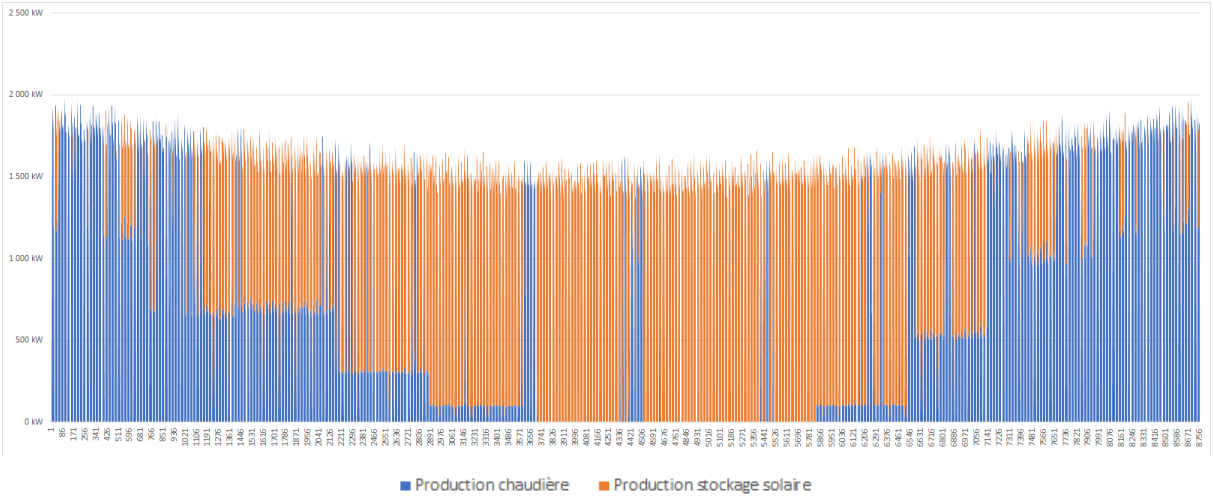


Figure 4-52 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, rouge=solaire) pour le scénario S10-Cref

Pour répondre au besoin client, une consommation de 5,2 GWh de gaz naturel est nécessaire.

4.12.2.3 Qualité des données

Tableau 4-31 : Qualité des données pour le S10-Créf

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Cables électriques					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Chaudière grande puissance									
	Pont roulant									
	Cheminée									
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Forage					Consommation au forage extrapolée				
Usage	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.13 Cas d'étude 11

Les inventaires matière et énergie pour chacun des scénarios du cas d'étude 11 sont présentés dans les tableaux suivants. Les compositions matière détaillées de chacun des éléments sont données au § 4.2.1.

4.13.1 S11-RC Doublet géothermique et Pompe à chaleur

4.13.1.1 Inventaire matière

1 pompe à eau d'exhaure d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
1 801 kg	Estimation Tractebel basée sur des données fournies par des experts ENGIE

3 pompes réseau d'une durée de vie de 10 ans :

Masse (par pompe)	Source
3 079 kg	Estimation Tractebel basée sur des données fournies par des experts ENGIE

1 pompe à chaleur d'une puissance de 9,5 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
25 660 kg	Données réelles transmises par des experts ENGIE

La pompe à chaleur est chargée de 1360 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

1 pompe à chaleur d'une puissance de 8,6 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
28 500 kg	Données réelles transmises par des experts ENGIE

La pompe à chaleur est chargée de 1750 kg de réfrigérant R1234ze (estimatif Tractebel).

7 chaudières d'une puissance de 6 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
8 346 kg	Extrapolation réalisée à partir de la documentation Viessman

Un inhibiteur versé dans la nappe :

Volume	Source
4 479 litres	Données réelles transmises par des experts ENGIE

L'inhibiteur a été modélisé comme un mélange des procédés ecoinvent suivant :

- Ethylene glycol {RER}| production | Cut-off, S
- Benzal chloride {RER}| production | Cut-off, U
- Cocamide diethanolamine {RER}| cocamide diethanolamine production | Cut-off, S

2 transformateurs de 1 600 kVA et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse	Source
3 650 kg	Documentation technique Cahors [36]

1 588 m de câbles électriques d'une durée de vie de 50 ans :

Masse d'un m de câble	Source
448 g de cuivre	Le dimensionnement a été réalisé par Tractebel

Les équipements électriques d'une masse de 5 kg et d'une durée de vie de 25 ans comprenant le disjoncteur, le contacteur ainsi que divers équipements de tableau électrique :

Masse	Source
200 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

La régulation est modélisée par 3 équivalents PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 réseau de chaleur d'une longueur de 18,5 km (aller) et d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif est issu d'un REX Tractebel avec des masses volumiques pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

130 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
168 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
17 400 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

Un premier forage de 1 876 m :

Masse	Source
158 000 kg de béton et 217 583 kg d'acier	Données réelles transmises par des experts ENGIE

Un deuxième forage de 1 850 m :

Masse	Source
186 400 kg de béton et 186 343 kg d'acier	Données réelles transmises par des experts ENGIE

Les quantités de diesel pour le forage ont été fournies par les experts ENGIE.

4.13.1.2 *Inventaire énergie*

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S11-RC :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	64 062 858
Production de chaleur	kWh th	68 921 960
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	5 044 201
Consommation électrique des pompes à chaleur et des pompes du Dogger	kWh élec	10 349 900
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	
COP PAC + pompes		6,3
Rendement chaudière		Existantes : 80 % Nouvellement installées : 95 %
Taux EnR&R injecté dans le réseau		51 %

L'histogramme de production de chaleur des nouvelles installations (chaudières nouvellement installées et PAC) est présenté ci-dessous :

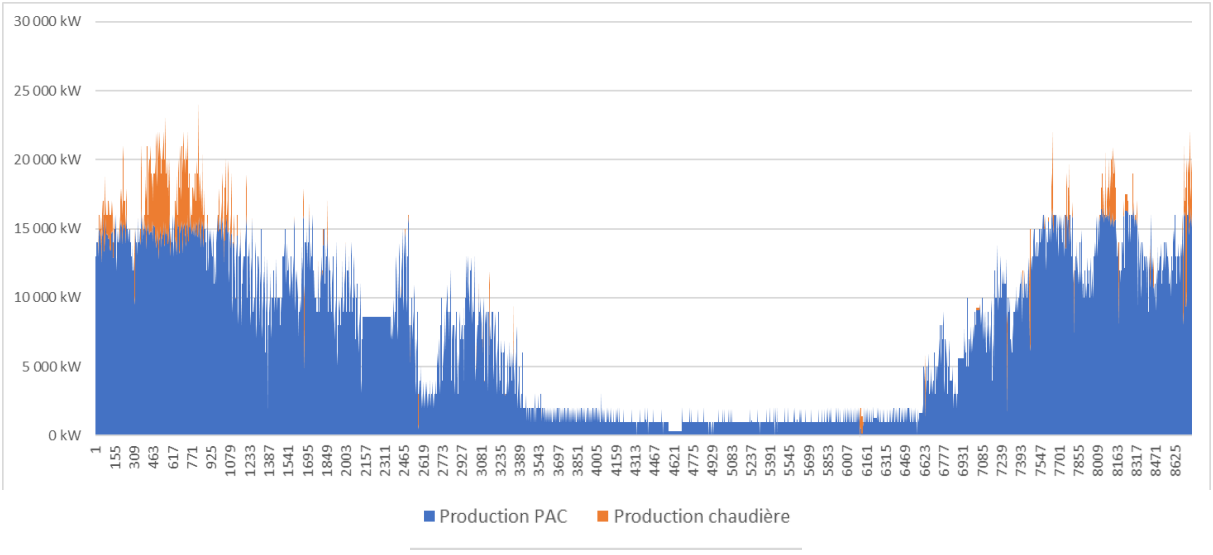


Figure 4-53 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production des PAC (en bleu) et des chaudières (en orange) dans le scénario S11-RC

Dans le cas de ce scénario S11-RC, un mix électrique dynamique spécifique pour les PAC et les pompes du Dogger a été modélisé. Ils sont présentés dans les figures suivantes :

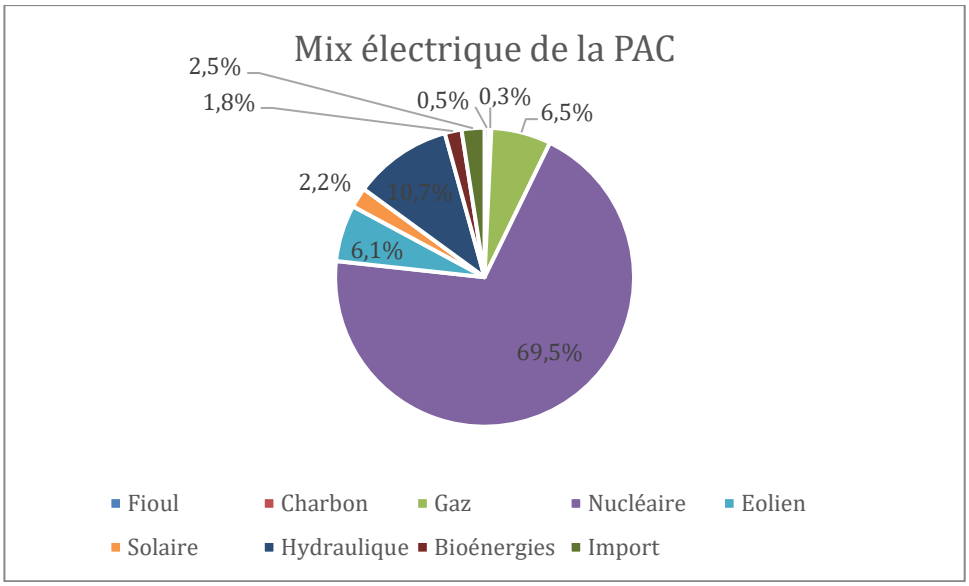


Figure 4-54 : Mix électrique spécifique de la PAC dans le scénario S11-RC

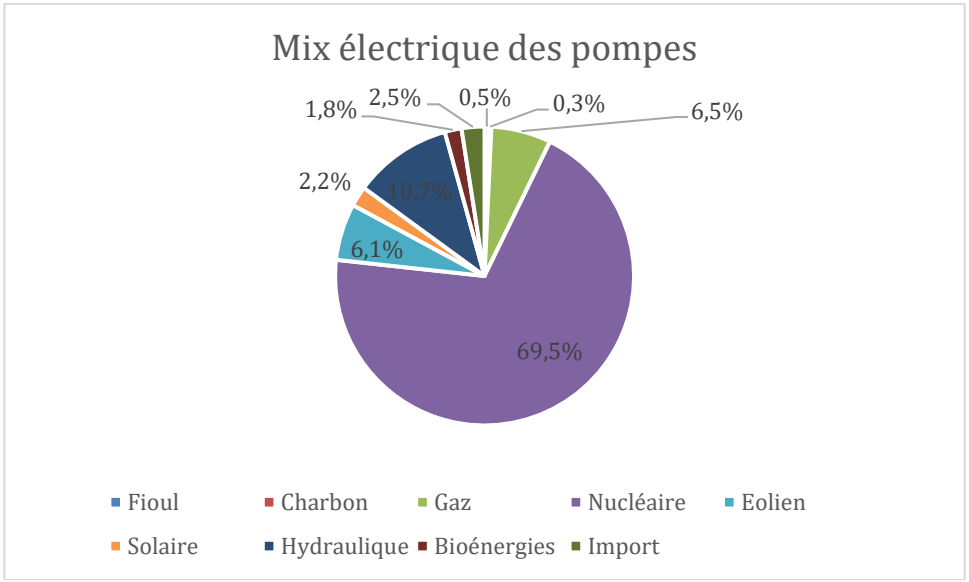


Figure 4-55 : Mix électrique spécifique des pompes dans le scénario S11-RC

4.13.1.3 Qualité des données

		Données premier plan					Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	**Procédés**	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Production	Pompes à chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France mais à partir d'un projet réel				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Chaudière									
	Pompes									
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Transformateur									
	Equipements électriques									
	Puits 1					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en Francemais à partir d'un projet réel				
	Puits 2									
	Réseau de Chaleur									
	Sous-station									
	Inhibiteur									
	Pompe d'exhaure									
	Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
	Cheminée									
	Pont roulant 25m 16T	[2]								
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Installation	Puits					Consommation de forage réelle				
	Packaging					Quantité générique de packaging				
	Fuites de réfrigérant à l'installation					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Usage	Consommations électriques					Données réelles				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz									Mix français
	Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Pertes réfrigérants					Donnée spécifique issue de publication britannique				Extrapolation des fuites/production de R134a
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération									
	Mise en décharge									

Tableau 4-32 : Qualité des données pour le scénario S11-RC

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et sont représentatives de la technologie utilisée pour le cas réel.
- Les masses de certains équipements (chaudière d'appoint) ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Il s'agit d'un cas réel donc les données de consommation ainsi que les équipements majoritaires (PACs, chaudières, puits, pompes et réseau) sont des données réelles de terrain. Les modélisations sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes et de bonne qualité car issues d'un scénario réel de déploiement de la technologie.

4.13.2 S11-Créf : Chaudière gaz

4.13.2.1 Inventaire matière

9 chaudières d'une puissance de 6 MW et d'une durée de vie de 25 ans :

Masse (par chaudière)	Source
8 346 kg	Extrapolation réalisée à partir de la documentation Viessman [27]

La régulation est modélisée par 3 équivalents PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

1 réseau de chaleur d'une longueur de 18,5 km (aller) et d'une durée de vie de 25 ans :

Composition (pour 1 m)	Source
5,26 kg	L'estimatif est issu d'un REX Tractebel avec des masses volumiques pour le PE et la mousse PU de 930 et de 40 kg/m^3 respectivement. Le DN moyen pris en compte est un DN150.

130 sous-stations d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
168 kg	Estimatif réalisé par Tractebel

Du génie civil d'une durée de vie de 50 ans :

Surface	Source
17 400 m² de chaufferie	Retours d'expérience Tractebel

Une cheminée d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
185 000 kg	Retours d'expérience Tractebel

Un pont roulant de 25 m d'une durée de vie de 50 ans :

Masse	Source
13 270 kg	La masse totale est donnée par la documentation Europont [43] pour un pont roulant de 16t et d'une portée de 25 m

4.13.2.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S11-Créf :

Paramètre	Unité	Valeur
Besoin en chaleur client	kWh th	64 062 858
Production de chaleur	kWh th	68 921 960
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	62 389 380
Consommation électrique des pompes du réseau	kWh élec	1 658 982
Rendement chaudière		Existantes : 80 % Nouvellement installée : 99,6 %

L'histogramme de production des chaudières pour le scénario S11-Créf est présenté ci-dessous :

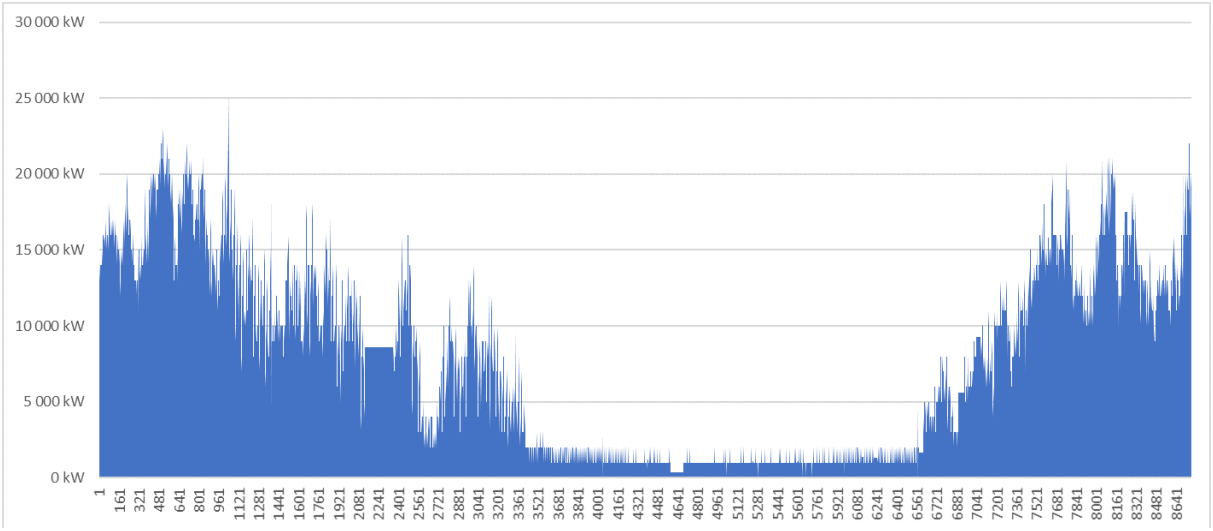


Figure 4-56 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production des chaudières dans le scénario S11-Créf

4.13.2.3 Qualité des données

	Données premier plan					Données second plan			
Procédés	**Précision**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**	**Représentativité temporelle**	**Représentativité géographique**	**Représentativité Technologique**	**Commentaire**
Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
Pompes									
Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Transformateur									
Equipements électriques									
Réseau de Chaleur					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France				
Sous-station									
Génie civil (m2 mur, sol)					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français				
Cheminée									
Pont roulant 25m 16T									
Transports					Règles de transport génériques sur des projets français				Donnée moyenne Européenne
Packaging					Quantité générique de packaging				
Réseaux									Extrapolation des installations de réseaux de gaz
Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée				Reconstitution des mix par source
Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée				Mix français
Emissions directes									Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
Régulation					Quantité générique pour un projet en France				
Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau				Donnée moyenne Européenne
Recyclage									Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
Incinération									
Mise en décharge									

Tableau 4-33 : Qualité des données pour le scénario S11-Créf

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

4.13.3 S11-Dréf : Chaudières gaz individuelles

4.13.3.1 Inventaire matière

130 chaudières d'une puissance de 345 kW et d'une durée de vie de 22 ans :

Masse	Source
687 kg	Documentation technique Viessman [52]

La régulation est modélisée par 0,5 équivalent PC. La quantification est réalisée par Tractebel.

4.13.3.2 Inventaire énergie

Le tableau ci-dessous présente les principales hypothèses relatives à la consommation énergétique du système S11-Dréf :

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Besoin en chaleur client	kWh th	64 062 858
Production de chaleur	kWh th	64 062 858
Consommation de gaz naturel	kWh PCI	66 971 580
Rendement chaudière		95,1 %

L'histogramme de production de la chaudière pour le scénario S11-Dréf est présenté ci-dessous :

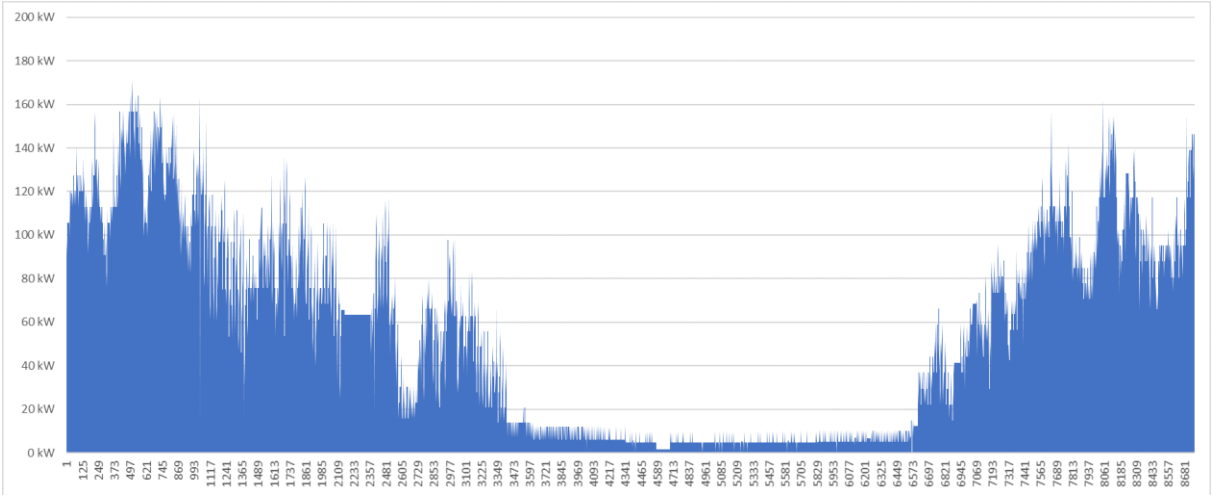


Figure 4-57 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production de la chaudière dans le scénario S11-Dréf

4.13.3.3 Qualité des données

Tableau 4-34 : Qualité des données pour le scénario S11-Dréf

		Données premier plan				
Etape du cycle de vie et système étudié	Procédés	Précision	Représentativité temporelle	Représentativité géographique	Représentativité Technologique	Commentaire
Production	Chaudière					Les quantités ont été estimées à partir de documentation technique de produits commercialisés en France
	Cables électriques					Quantités génériques de ces équipements dans des projets français
	Transformateur					
	Equipements électriques					
Distribution	Transports					Règles de transport génériques sur des projets français
Installation	Packaging					Quantité générique de packaging
Usage	Consommations électriques					Calcul pour la technologie spécifiée
	Consommations gaz					Calcul pour la technologie spécifiée
	Emissions directes					
	Régulation					Quantité générique pour un projet en France
Fin de Vie	Transports					Taux de fin de vie issus des recommandations Européennes par type de matériau
	Recyclage					
	Incinération					
	Mise en décharge					

		Données second plan			
Etape du cycle de vie et système étudié	Procédés	Représentativité temporelle	Représentativité géographique	Représentativité Technologique	Commentaire
Production	Chaudière				Les données matières ont été choisies sur des périmètres plus larges (Europe) afin de prendre en compte également les transports d'acheminement. Dans la mesure du possible, les données ont été modélisées avec des procédés technologiques les plus représentatifs.
	Cables électriques				
	Transformateur				
	Equipements électriques				
Distribution	Transports				Donnée moyenne Européenne
Installation	Packaging				
Usage	Consommations électriques				Reconstitution des mix par source
	Consommations gaz				Mix français
	Emissions directes				Adaptation des émissions directes au contexte normatif français
	Régulation				
Fin de Vie	Transports				Donnée moyenne Européenne
	Recyclage				Les données de fin de vie ont été modélisées le plus possible en contexte français sur les technologies les plus représentatives
	Incinération				
	Mise en décharge				

Les points d'attention concernant la qualité des données sont les suivants :

- Les compositions matière des différents équipements ont été estimées sur la base de documentations techniques et ne sont pas représentatifs d'un lot de produits pour une technologie donnée.
- Les masses de ces équipements ont également été estimées à partir des données de dimensionnement et des documentations techniques

Les consommations énergétiques sont calculées en prenant en compte les spécificités de technologies et sont de bonne qualité à l'exception de quelques approximations de certaines filières comme le biogaz (indiqué en 4.3.1.3).

Au global, les données sont complètes mais souvent approximées sur des bases de littérature au vu de la collecte de données peu fructueuse auprès des fournisseurs.

5 Evaluation de l'impact du cycle de vie

La phase d'évaluation permet de traduire les consommations et les rejets recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux.

La phase d'interprétation permet quant à elle d'identifier les problèmes environnementaux non négligeables du produit étudié grâce à des analyses par vérification de la complétude, de la sensibilité et de la cohérence. L'interprétation doit prendre en compte le caractère approprié des définitions des fonctions du système, de l'unité fonctionnelle et de la frontière du système ; ainsi que les limitations identifiées par l'évaluation de la qualité des données et l'analyse de sensibilité.

5.1 Procédure d'analyse commune à tous les cas d'étude

5.1.1.1 Procédure générale

Pour chacun des cas d'étude, les impacts environnementaux de chacun des systèmes sont calculés avec les 16 indicateurs midpoint définis au § 3.2.8.1, et présentés dans un tableau. Afin d'en faciliter la lecture, l'impact le plus faible est coloré en vert, l'impact le plus élevé est coloré en rouge. Ce code couleur ne signifie cependant pas que les écarts entre les deux résultats sont suffisamment significatifs pour conclure qu'un système est plus performant qu'un autre. Les écarts nécessaires pour ce type de conclusion dépendent de l'indicateur considéré, et de la qualité des données d'inventaire de cycle de vie qui ont été utilisées. Les résultats sur chaque indicateur doivent donc être analysés individuellement. Etant donné le grand nombre d'indicateur évalués, il n'est pas possible de réaliser cette analyse pour tous les indicateurs et pour tous les cas d'étude. Nous avons donc utilisé une approche permettant de concentrer l'analyse sur les résultats les plus importants, selon l'approche présentée dans la figure ci-dessous :

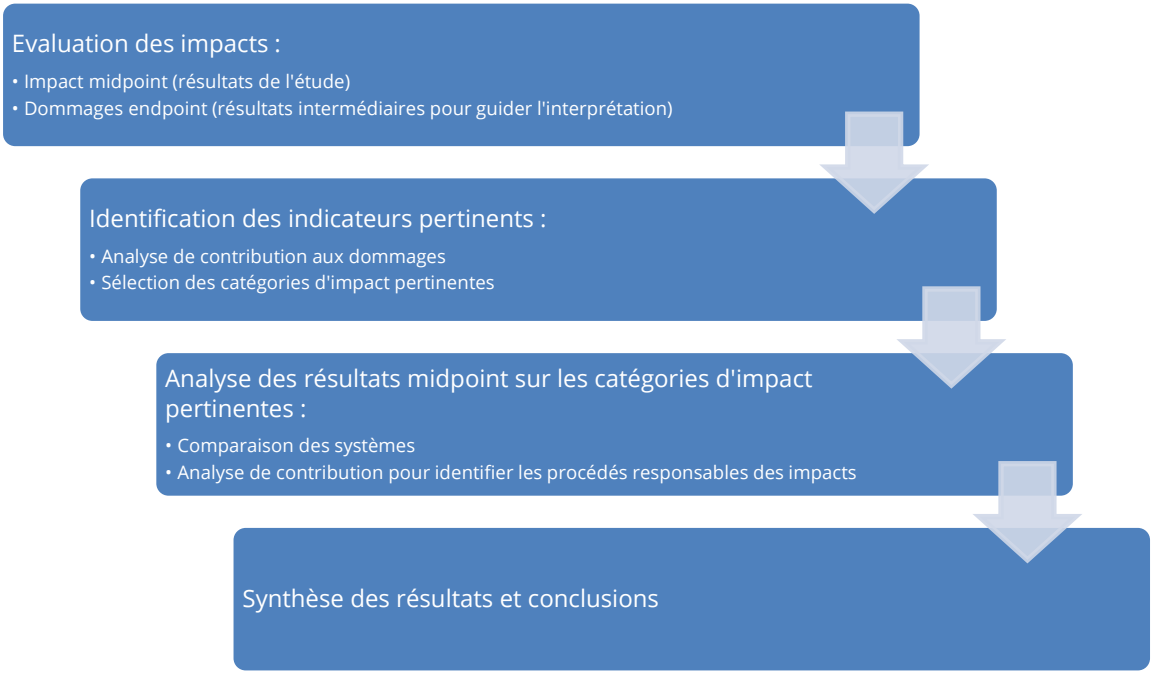


Figure 5-1 : Procédure d'analyse des résultats

5.1.1.2 Identification des indicateurs pertinents

Pour chaque cas d'étude, nous avons donc procédé à une identification des indicateurs pertinents, en calculant les dommages environnementaux à l'aide d'indicateurs endpoint. Nous avons analysé la contribution des catégories d'impacts aux dommages dans chacun des trois domaines de protection : santé humaine, écosystèmes et ressources naturel. Pour chaque domaine de protection :

- Les catégories d'impact ont été classées de la plus contributrice à la moins contributrice.
- Les catégories d'impact les plus contributrices responsables d'au moins 60 % des dommages à ce domaine pour au moins un des systèmes comparés ont été sélectionnées comme pertinentes.
- Si, parmi les catégories restantes, certaines contribuaient à plus de 20 % des dommages pour au moins un des systèmes comparés, elles ont été ajoutées à la liste.

5.1.1.3 Analyse des indicateurs pertinents et critères d'analyse

Ensuite, pour chaque indicateur identifié comme pertinent, une analyse détaillée des résultats est réalisée, avec deux objectifs :

- Comparer les systèmes entre eux, et identifier quel système est le plus performant sur cet indicateur.
- Analyser la contribution aux impacts du cycle de vie, pour identifier les procédés qui sont responsables des plus gros impacts et les leviers prioritaires pour réduire ces impacts.

A notre connaissance, il n'existe pas vraiment de consensus sur les critères qui permettent de déterminer si les écarts entre deux impacts sont suffisamment importants pour être considérés comme significatifs. Nous avons considéré que les écarts nécessaires pour dire qu'une différence d'impact est significative dépendait du niveau de recommandation de l'indicateur, présenté dans le Tableau 3-6 au § 3.2.8.1 :

- Pour un indicateur de niveau I, un écart de 10 % suffit à départager deux systèmes ;
- Pour un indicateur de niveau II, un écart de 30 % est nécessaire ;
- Pour un indicateur de niveau III, un écart encore plus important est nécessaire. Par défaut, nous avons considéré qu'un écart de l'ordre de 50 %, était nécessaires, mais certains praticiens considèrent que ces écarts devraient être encore plus élevés.

Ce raisonnement repose sur le fait que le niveau de recommandation peut être vu comme une manière d'évaluer l'incertitude dans la valeur des facteurs de caractérisation d'un indicateur (incertitude faible pour un indicateur de niveau I, incertitude élevée pour un indicateur de niveau III). Ainsi, dans le cas où l'écart est trop faible pour départager deux systèmes, une analyse des flux les plus contributeurs a été réalisée. Si le même flux est le principal contributeur pour les deux systèmes à départager, l'incertitude du facteur de caractérisation n'entre pas en compte puisqu'elle affecte les deux systèmes de la même manière. Ainsi, cette analyse supplémentaire a permis de départager certains systèmes même dans le cas où les écarts entre eux étaient inférieurs aux seuils définis plus haut.

En ce qui concerne l'épuisement des ressources énergétiques, un critère d'analyse spécifique a été utilisé. Cet indicateur est classé niveau III selon le référentiel ILCD, car il considère que toutes les énergies fossiles et l'uranium fissile sont totalement interchangeables, et que la consommation d'un MJ d'énergie primaire de chacun de ces types d'énergie non renouvelable est équivalente. En réalité, cet indicateur mesure plutôt la consommation d'énergie primaire non renouvelable que l'épuisement des ressources énergétiques. C'est pour cette raison qu'il a été classé en niveau III. Pour autant, nous avons considéré qu'un critère de 10 % d'écart sur cet indicateur est plus approprié qu'un critère de 50 %.

5.2 Cas d'étude 1

Rappel des configurations des scénarios :

- S1-RC1 : réseau de chaleur alimenté par une PAC sur sondes géothermiques verticales ;
- S1-RC2 : réseau de chaleur alimenté par une PAC sur aquifère ;
- S1-Cref : réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- S1-Dref1 : chaudières gaz par bâtiment ;
- S1-Dref2 : PAC aérothermique par bâtiment.

5.2.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 1 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-1 : Cas d'étude 1 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S1-RC1	S1-RC2	S1-Cref	S1-Dref1	S1-Dref2
Changement climatique	35%	28%	89%	100%	20%
Destruction de la couche d'ozone	31%	24%	45%	46%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	80%	61%	7%	0%	100%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	83%	60%	95%	100%	61%
Particules fines	100%	74%	31%	25%	96%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	87%	73%	29%	21%	100%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	94%	87%	38%	26%	100%
Acidification terrestre et eau douce	92%	68%	54%	49%	100%
Eutrophisation, eau douce	66%	48%	13%	9%	100%
Eutrophisation, marine	100%	72%	78%	70%	92%
Eutrophisation, terrestre	100%	75%	62%	54%	98%
Ecotoxicité, eau douce	83%	70%	28%	21%	100%
Usage des sols	100%	78%	16%	8%	87%
Consommation d'eau	89%	63%	10%	4%	100%
Ressources énergétiques	96%	74%	82%	80%	100%
Ressources minérales et métalliques	38%	29%	12%	12%	100%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire. Le classement entre les scénarios centralisés et décentralisés dépend fortement de l'indicateur considéré. Les scénarios S1-RC2 et S1-Cref ne sont sur aucun indicateur les scénarios les plus impactants. Les scénarios S1-Dref1 et S1-Dref2 ont la particularité d'opposer leurs impacts, le scénario Dref1 est le scénario le moins impactant sur 12 indicateurs, cependant il est le scénario le plus impactant sur l'indicateur de changement climatique et de formation d'ozone, au contraire du scénario S1-Dref2. Il est à ce stade difficile de départager les scénarios, notamment car la hiérarchie entre les différents systèmes comparés est différente sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquels il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.2.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 1 sur chacun des impacts endpoint considérés.

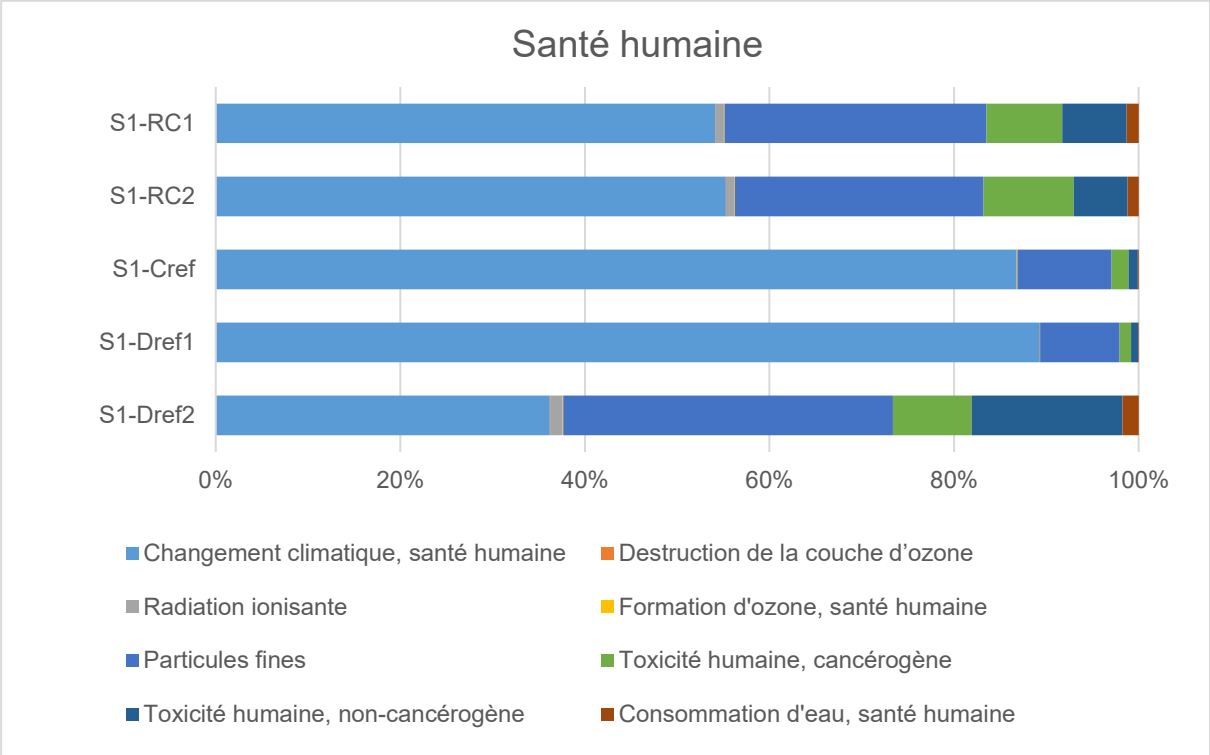


Figure 5-2 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Suivent dans un second ordre ceux liés aux particules fines et la toxicité humaine.

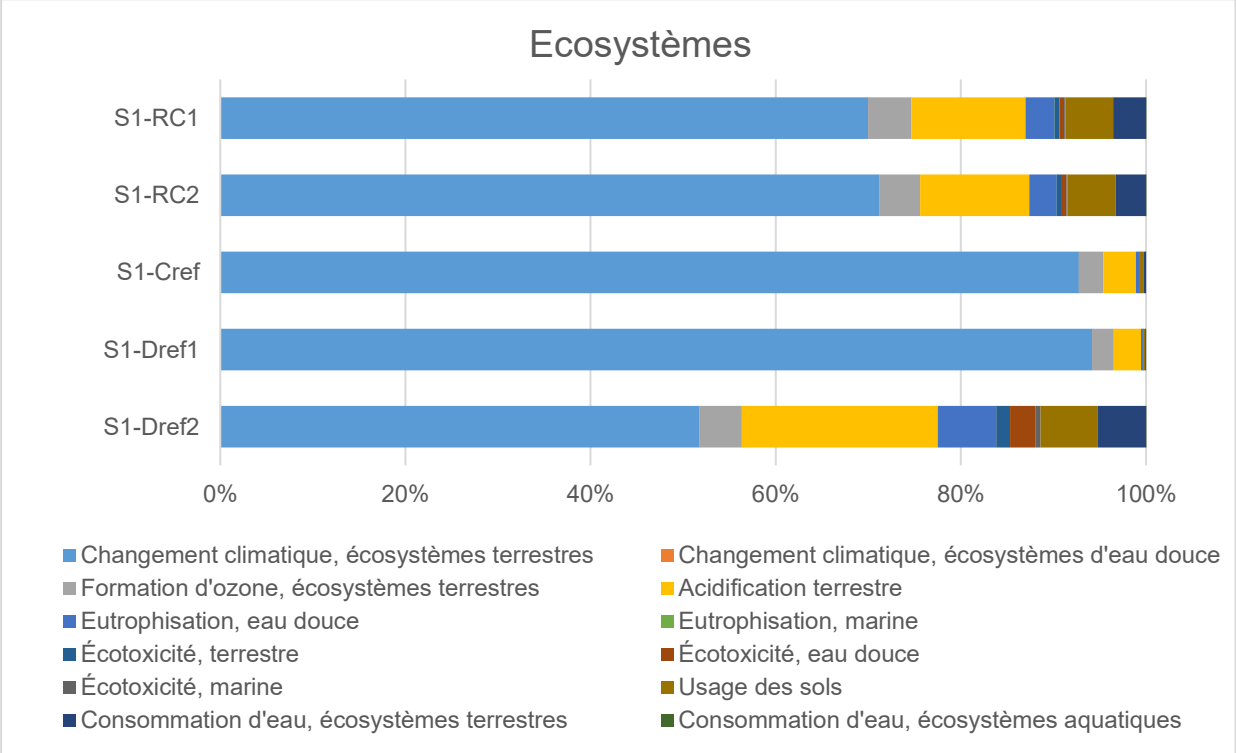


Figure 5-3 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique, suivis dans un second ordre par l'indicateur d'acidification terrestre.

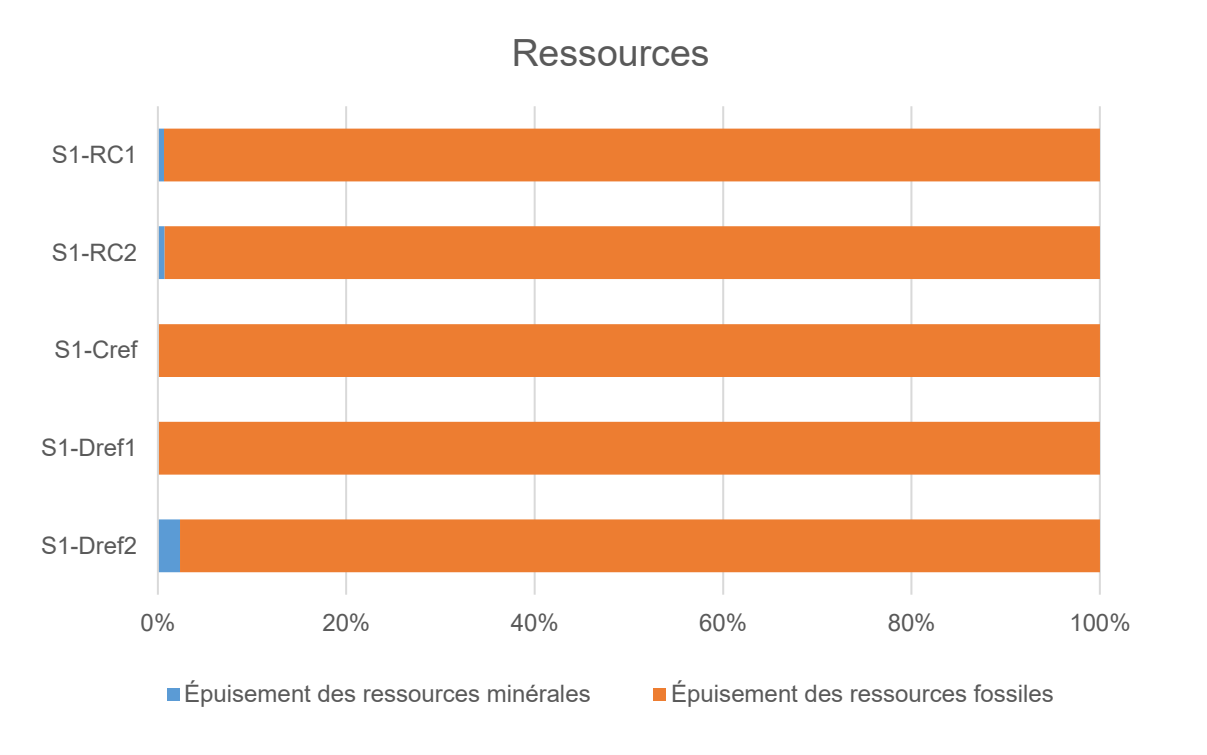


Figure 5-4 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques, les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 1 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Particules fines ;
- Acidification terrestre et eau douce ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.2.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.2.3.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur de changement climatique.

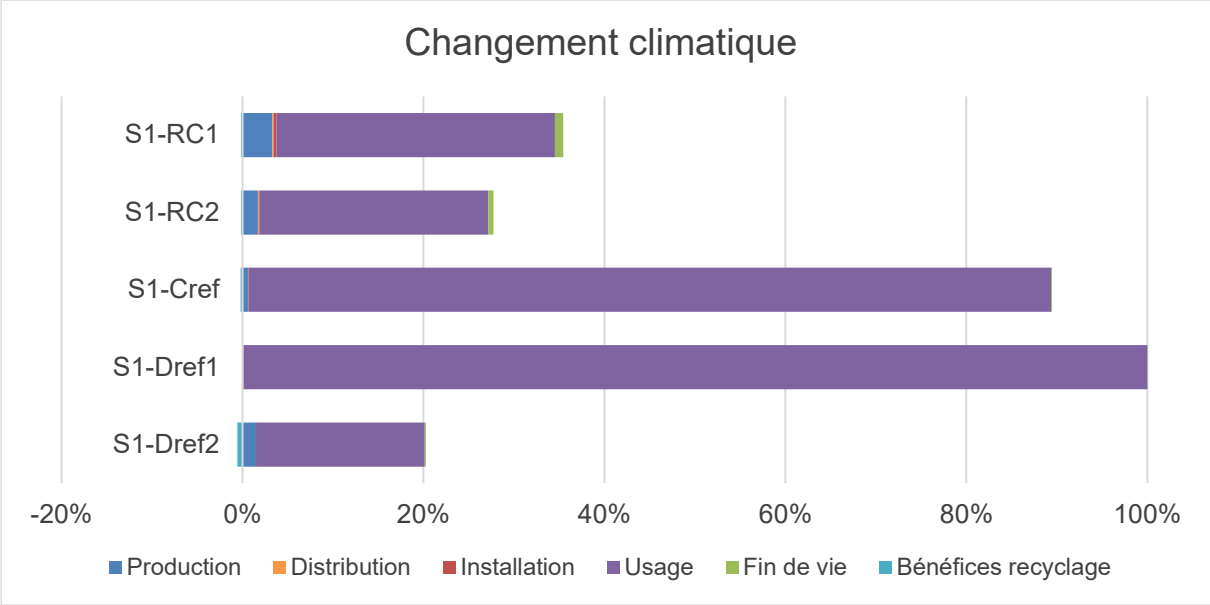


Figure 5-5 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios à base de PAC sont de l'ordre de deux fois plus performants que les chaudières gaz ;
- Les PAC décentralisées sont les scénarios qui émettent le moins de GES, car pour les PAC centralisées, un appoint est réalisé avec une chaudière gaz, qui couvre environ 17 % de la demande de chaleur, mais est responsable d'environ 75 % des émissions GES de la phase d'usage ;
- Le scénario S1-Dref1 est le plus impactant, devant le scénario conventionnel centralisé S1-Cref

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 85 % des impacts pour chaque scénario ;
- L'étape de production représente entre 7 et 10 % de l'impact du scénario S1-RC1 et S1-Dref2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-2 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S1 RC1		**S1 RC2**		**S1 Cref**		**S1 Dref1**		**S1 Dref2**	
Emissions liées à la combustion de gaz naturel (appoint)	42%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel (appoint)	46%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	82%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	78%	Consommation d'électricité des PAC	94%
Consommation d'électricité de la PAC	29%	Consommation d'électricité de la PAC	28%						

Consommation d'électricité des pompes réseaux	8%	Consommation d'électricité des pompes réseaux	9%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	16%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	22%		

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;
- Les impacts liés à la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon dans le mix électrique français.

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité de gaz et d'électricité consommée. Les scénarios S1-Cref et S1-Dref1 composés de chaudières gaz sont les scénarios les plus émetteurs de CO_2 eq., causés par la combustion du gaz naturel, bien plus impactant sur le changement climatique que l'électricité française. Le scénario S1-RC1 se distingue du scénario S1-RC2 par une consommation plus forte en gaz pour son appoint en chaleur et une demande en électricité plus faible pour le fonctionnement des pompes et PAC. Les PAC sur sondes géothermiques (S1-RC2) sont plus complexes à construire que les PAC sur aquifère (S1-RC1) et demandent de mettre en œuvre davantage de matériaux. Cependant, elles possèdent généralement un COP plus élevé, ce qui réduit la quantité d'électricité nécessaire pour produire la même quantité de chaleur et donc d'améliorer leur performance carbone. Le scénario Dref2 est le scénario le moins impactant sur cet indicateur, car ne nécessite pas d'appoint en gaz fournis par des énergies fossiles. Il est réalisé par une résistance électrique grâce à sa PAC aérothermique, ce qui augmente la consommation d'électricité.

Les PAC centralisées ont donc une performance carbone supérieure à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S1-RC1 et S1-RC2 viennent de l'appoint au gaz. Le recours au gaz doit être limité au maximum pour améliorer leur performance carbone, par exemple en augmentant la puissance de la PAC.

5.2.3.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'émission de particules fines.

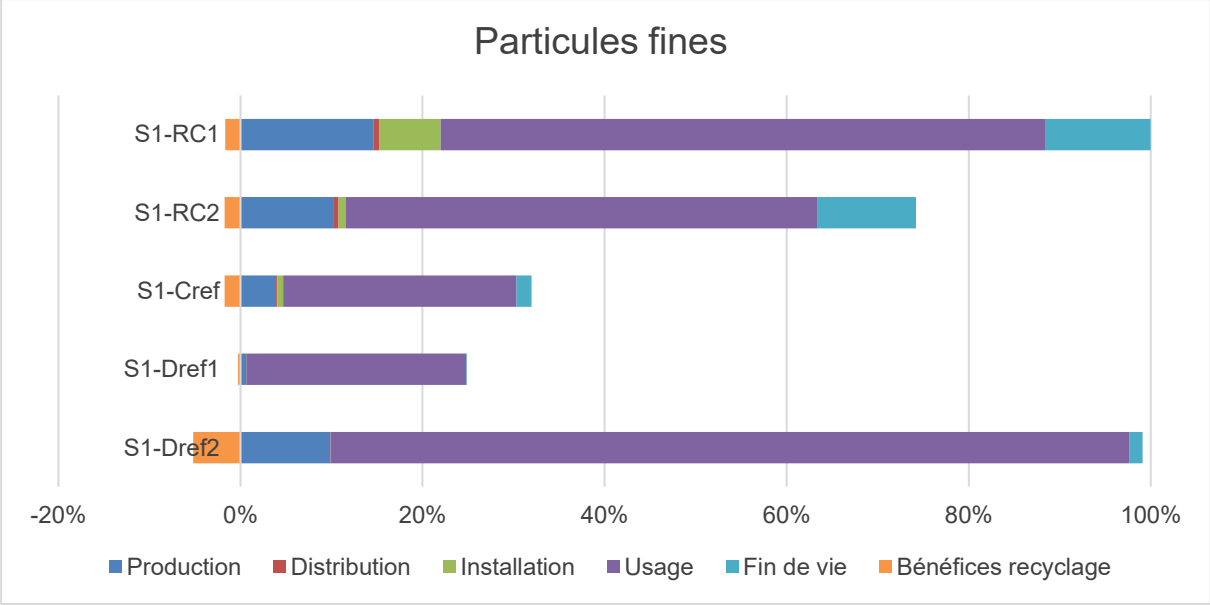


Figure 5-6 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse du changement climatique, les solutions à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) ont des impacts entre deux et trois fois plus importants que les chaudières gaz.;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage qui émet plus de particules fines que l'utilisation de gaz naturel ;
- Le scénario S1-Cref est légèrement plus impactant que sa variante décentralisée S1-Dref1

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 68 à 98 % des impacts pour chaque scénario ;
- L'étape de production représente plus de 10 % des scénarios excepté le scénario S1-Dref1 ;
- L'étape de fin de vie représente plus de 11 % des scénarios S1-RC1 et S1-RC2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-3 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

S1 RC1		S1 RC2		S1 Cref		S1 Dref1		S1 Dref2	
Consommation électrique de la PAC	48%	Consommation électrique de la PAC	49%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	48%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	74%	Consommation électrique des PAC	93%
Génie civil – démantèlement (9%), production du béton (3%), production de l'acier (2%)	15%	Génie civil – démantèlement (12%), production de l'acier, (5%), production du béton (4%),	21%	Emissions liées à la combustion de gaz	20%				
Consommation électrique des pompes réseaux	15%	Consommation électrique des pompes réseaux	17%	Consommation électrique des pompes réseaux	17%	Emissions liées à la combustion de gaz	23%		

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à la phase de démantèlement des matériaux, notamment lors de la combustion de carburant dans les machines ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission de particules fines lors de la combustion.

Conclusion sur l'indicateur d'émission particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz et de la quantité de matériaux utilisé dans la production des réseaux de chaleur et PAC. Le scénario S1-RC1 se distingue du scénario S1-RC2 principalement par une consommation d'électricité et une phase d'installation plus importante. Les PAC sur sondes géothermiques (S1-RC2) sont plus complexes à construire que les PAC sur aquifère (S1-RC1), cependant elles possèdent généralement un COP plus élevé, ce qui réduit la quantité d'électricité nécessaire pour produire la même quantité de chaleur, et donc d'améliorer leur performance. Le scénario S1-Dref2 composé de PAC aérothermiques par bâtiment est un des scénarios

les plus impactant, causé par une consommation importante d'électricité et une étape de production non négligeable.

Les PAC centralisées ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S1-RC1 et S1-RC2 viennent de leur consommation électrique et des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doivent être limitées au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.2.3.3 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce.

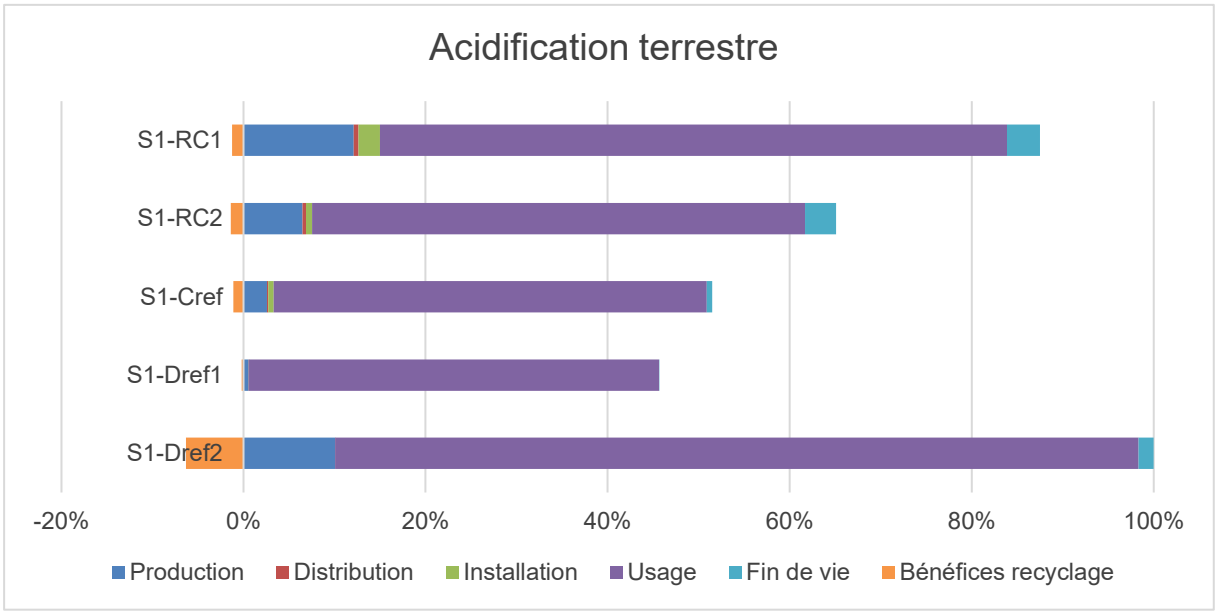


Figure 5-7 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse du changement climatique, les solutions à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) ont des impacts plus importants que les chaudières gaz ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage, et de métaux/béton dans la phase de génie civil que l'on retrouve sur l'étape d'installation, de production et de fin de vie ;
- Les scénarios avec chaudières gaz S1-Cref et S1-Dref1 sont équivalents vis-à-vis des incertitudes en ACV.
- Les scénarios S1-RC1 et S1-Dref2 ne peuvent être départagés au vu des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 79 à 99 % des impacts pour chaque scénario ;
- L'étape de production représente entre 10 et 14% des scénarios S1-RC1, S1-RC2, S1-Dref2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-4 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

S1 RC1		S1 RC2		S1 Cref		S1 Dref1		S1 Dref2	
Consommation électrique de la PAC	53%	Consommation électrique de la PAC	55%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	67%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	82%	Consommation électrique des PAC	94%
Consommation électrique des pompes réseaux	16%								
Emissions liées à la distribution du gaz en amont	8%	Consommation électrique des pompes réseaux	18%	Emissions liées à la combustion de gaz	18%				
Génie civil – démantèlement (3%), production de l'acier (2%), production du béton (2%)	7%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	9%						

Les analyses de ces différents procédés ont permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon (émission de dioxyde de soufre dans l'air) et des centrales à biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) dans le mix électrique français ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'émission de dioxyde souffre et d'oxyde d'azote dans l'air dans la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à l'émission d'oxyde d'azote dans l'air lors de la combustion de diesel dans les machines utilisées lors de la phase de démantèlement de l'acier en fin de vie ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission d'oxyde d'azote dans l'air.

Conclusion sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz et de la quantité de matériaux utilisée dans la production des réseaux et PAC. Le scénario S1-RC1 se distingue du scénario S1-RC2 principalement par une consommation plus importante d'électricité et une phase d'installation plus importante. Les PAC sur sondes géothermiques (S1-RC2) sont plus complexes à construire que les PAC sur aquifère (S1-RC1), cependant elles possèdent généralement un COP plus élevé, ce qui réduit la quantité d'électricité nécessaire pour produire la même quantité de chaleur, et donc d'améliorer leur performance. Le scénario S1-Dref2 composé de PAC aérothermique par bâtiment est le scénario le plus impactant, causé par une consommation plus importante d'électricité et une étape de production non négligeable.

Les PAC ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S1-RC1 et S1-RC2 viennent de leur consommation électrique et des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doivent être limitées au maximum pour en améliorer la performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage ou en utilisant un mix électrique contenant une plus faible part de biogaz.

5.2.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

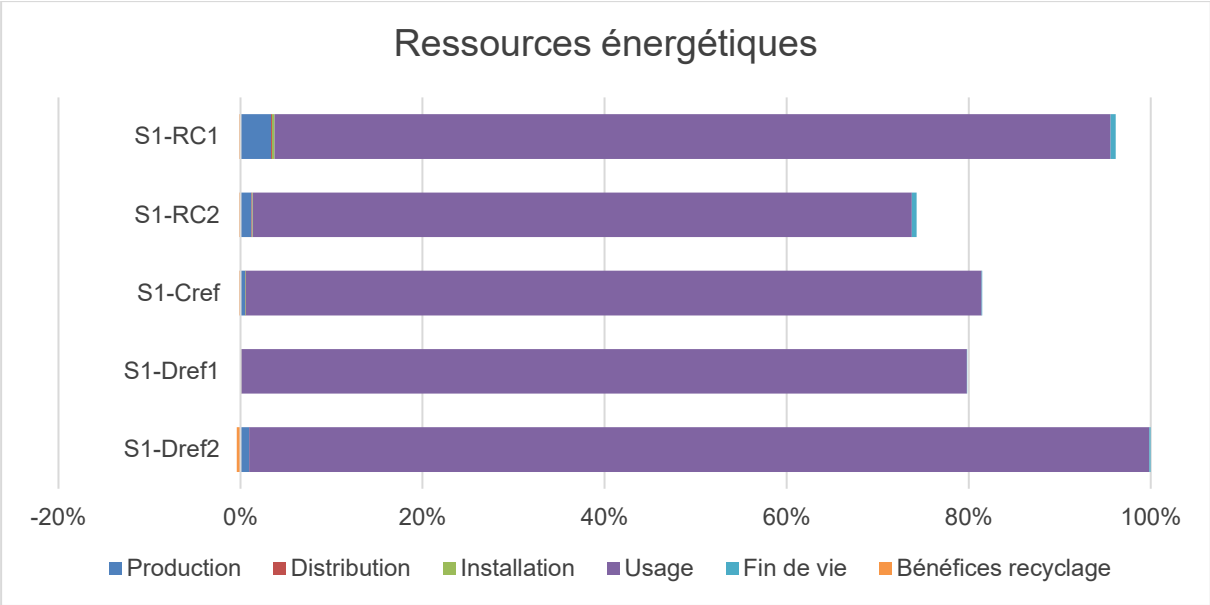


Figure 5-8 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse des autres indicateurs, les différences entre les solutions PAC et chaudières gaz sont moins importantes ;
- La raison principale est que malgré une demande supérieure (plus de deux fois) en énergie finale des solutions avec chaudières gaz, l'impact sur les ressources énergétiques de la production d'électricité (principalement à partir d'énergie nucléaire, voir Figure 4-7, Figure 4-9 et Figure 4-13) est trois fois plus important que celui de la production de gaz naturel ;
- Les trois scénarios S1-RC2, S1-Cref et S1-Dref1 sont équivalents vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 95 % pour tous les scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-5 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

S1 RC1		S1 RC2		S1 Cref		S1 Dref1		S1 Dref2	
Consommation électrique de la PAC	60%	Consommation électrique de la PAC	59%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	92%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	99%	Consommation électrique des PAC	99%
Consommation électrique des pompes réseaux	20%	Consommation électrique des pompes réseaux	21%						
Emissions liées à la distribution du gaz en amont	16%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	17%						

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'utilisation de gaz naturel.

La comparaison des scénarios peut être menée malgré les incertitudes car seuls deux flux élémentaires sont responsables des impacts.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz. Les solutions S1-RC1 et S1-Dref2 ont un impact supérieur de 20 % par rapport aux autres solutions. On retrouve la même hiérarchie que sur les indicateurs hors changement climatique, entre les solutions S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2, cependant les solutions avec chaudières cette fois sont équivalentes à la solution S1-RC2. Le scénario S1-RC1 se distingue du scénario S1-RC2 principalement par une consommation plus importante d'électricité. Les PAC sur sondes géothermiques (S1-RC2) sont plus complexes à construire que les PAC sur aquifère (S1-RC1), cependant elles possèdent généralement un COP plus élevé, ce qui réduit la quantité d'électricité nécessaire pour produire la même quantité de chaleur, et donc d'améliorer leur performance. Le scénario S1-Dref2 composé de PAC aérothermique par bâtiment est un des scénarios les plus impactant, causé par une consommation importante d'électricité.

Les PAC centralisées ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz, mis à part la solution S1-RC2 qui est équivalente. Les PAC (qui pompent de la chaleur dans l'environnement) ont l'avantage d'avoir un COP élevé, mais fonctionnant à l'électricité, le bénéfice de ce COP est très réduit par le coefficient de conversion de l'électricité en énergie primaire élevée également. Ce résultat dépend cependant beaucoup du mix électrique considéré. Une analyse de sensibilité est réalisée sur ce mix au § 6.2.1.4.

5.2.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques.

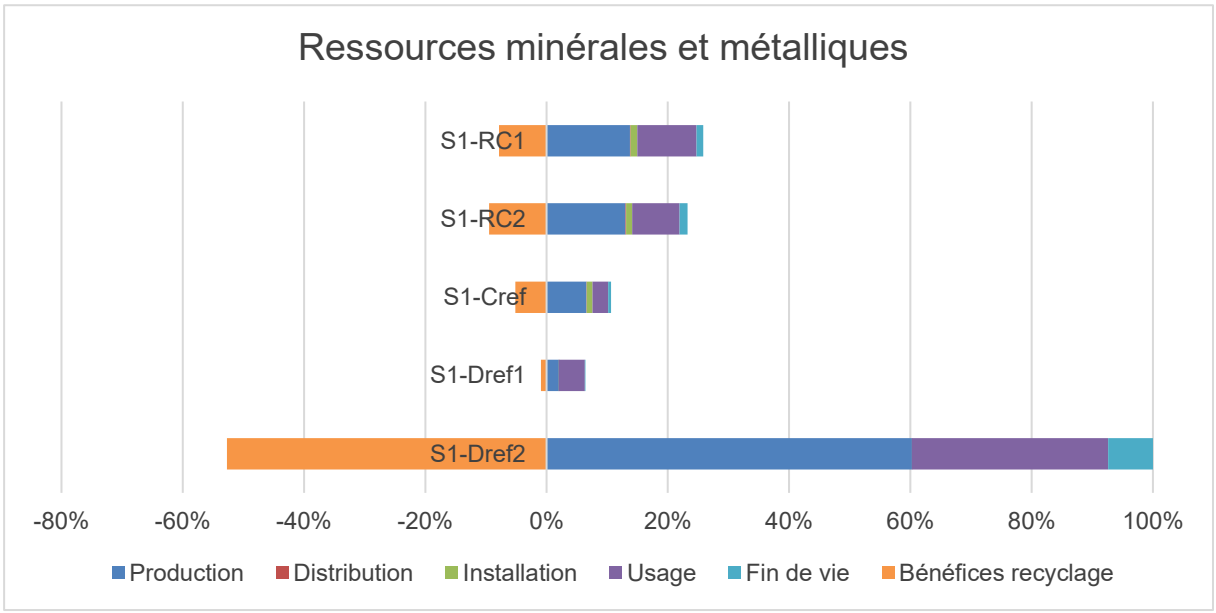


Figure 5-9 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les solutions à base de chaudières gaz demandent la quantité la plus faible de métaux, et ont donc un impact plus faible ;

- Pour les solutions à base de PAC centralisées, il faut tout de même investir dans une chaudière pour assurer l'appoint et le secours, ce qui nécessite aussi des matériaux ;
- La solution PAC décentralisée (S1-Dref2) est de loin la plus impactante ;
- Les scénarios avec chaudières gaz S1-Cref et S1-Dref1 sont équivalents vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 67 % pour le scénario S1-Dref1 et de 24 à 38 % pour le reste des scénarios ;
- L'étape de production est responsable de 36 % pour le scénario S1-Dref1 et de 53 à 62 % des impacts pour le reste des scénarios ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter 14 % de l'impact du scénario S1-Dref1 et de 30 à 51 % pour le reste des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-6 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

S1 RC1		S1 RC2		S1 Cref		S1 Dref1		S1 Dref2	
Consommation électrique de la PAC	38%	Consommation électrique de la PAC	39%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	30%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	59%	Consommation électrique des PAC	66%
Production de propylène glycol	16%	Consommation électrique des pompes réseaux	15%	Construction du réseau de chaleur	18%				
Consommation électrique des pompes réseaux	13%	Génie civil - production du béton (5%), production de l'acier (5%)	12%	Consommation électrique des pompes réseaux	15%	Production de la chaudière à condensation – production du cuivre et laiton	22%	Production de des PAC aérothermiques – production du cuivre	31%
Génie civil - production du béton (4%), production de l'acier (4%)	9%	Construction du réseau de chaleur	7%	Production des pompes – production du cuivre	13%				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent dans les différentes étapes du procédé ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz, principalement par la production d'acier et de cuivre utilisés dans les infrastructures ;
- Les impacts de la production de la chaudière pour le scénario S1-Dref1 sont causés par la production de cuivre et de laiton ;
- Les impacts de la production de la PAC pour le scénario S1-Dref2 sont causés par la production de cuivre utilisé dans le moteur et l'évaporateur ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à la production du béton et de l'acier pour les infrastructures.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz, du type de matériaux et de la quantité utilisée. Les scénarios S1-RC1 et S1-RC2 ne se distingue pas suffisamment sur cet indicateur pour les départager. Le scénario Dref2 composé de PAC aérothermique par bâtiment est le scénario le plus

impactant, causé par une consommation importante d'électricité et une étape de production nécessitant un plus grand nombre de matériaux.

Les PAC centralisées ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S1-RC1 et S1-RC2 viennent de leur consommation électrique et des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier, de béton et de glycol pour le scénario S1-RC1 doit être limité au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.2.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 1

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 1, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 5 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	**Systèmes plus performants que les systèmes étudiés**	**Systèmes moins performants que les systèmes étudiés**	**Classement entre les 2 systèmes étudiés**	**Principale source de l'impact des systèmes étudiés S1-RC1 et S1-RC2**
Changement climatique	PAC aérothermique par bâtiment (S1-Dref2)	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S1-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S1-Dref1)	S1-RC2 plus performant que S1-RC1	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage, dues à l'appoint au gaz naturel
Particules fines	Chaudières gaz par bâtiment (S1-Dref1) Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S1-Cref)	PAC aérothermique par bâtiment (S1-Dref2) moins performant que le Réseau de chaleur alimenté par une PAC sur aquifère (S1-RC2)	S1-RC2 plus performant que S1-RC1 et S1-Dref2 et S1-RC1 équivalent à S1-Dref2	Consommation électrique des PAC
Acidification terrestre et eau douce	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S1-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S1-Dref1)	PAC aérothermique par bâtiment (S1-Dref2) moins performant que le Réseau de chaleur alimenté par une PAC sur aquifère (S1-RC2)	S1-RC2 plus performant que S1-RC1 et S1-Dref2 et S1-RC1 équivalent à S1-Dref2	Consommation électrique des PAC
Ressources énergétiques	Le Réseau de chaleur alimenté par une PAC sur aquifère (S1-RC2) est le système le plus performant. Viennent ensuite les systèmes à base de chaudières au gaz naturel (S1-Dref1 et S1-Cref). Le Réseau de chaleur alimenté par une PAC sur sondes géothermiques verticales (S1-RC1) et le système PAC aérothermique par bâtiment (S1-Dref2) sont les moins performants et sensiblement équivalents			Consommation électrique des PAC

Indicateur	Systèmes plus performants que les systèmes étudiés	Systèmes moins performants que les systèmes étudiés	Classement entre les 2 systèmes étudiés	Principale source de l'impact des systèmes étudiés S1-RC1 et S1-RC2
Ressources minérales et métalliques	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S1-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S1-Dref1)	PAC aérothermique par bâtiment (S1-Dref2)	Différences non-significatives au regard des incertitudes Performances équivalentes	Consommation électrique (PAC et pompes) Production du propylène glycol (S1-RC1 uniquement)

Conclusions tous indicateurs confondus

En considérant uniquement les résultats par indicateur, il est difficile de déterminer quels sont les systèmes qui présentent les meilleures performances environnementales. Les conclusions qu'on peut en tirer dépendent donc fortement de l'importance que le décideur souhaite accorder à chaque indicateur. On peut cependant analyser les résultats obtenus sur les indicateurs endpoint, qui permettent d'évaluer les dommages causés par ces systèmes. Pour permettre de visualiser plus facilement la contribution relative de chaque catégorie d'impact et de comparer les systèmes, les deux graphiques suivants représentent les dommages de chaque système dans leur unité respective. Pour rappel, les modèles endpoint sont très incertains, et il faut des écarts significatifs pour pouvoir établir une hiérarchie. On se gardera donc de donner des conclusions trop tranchées.

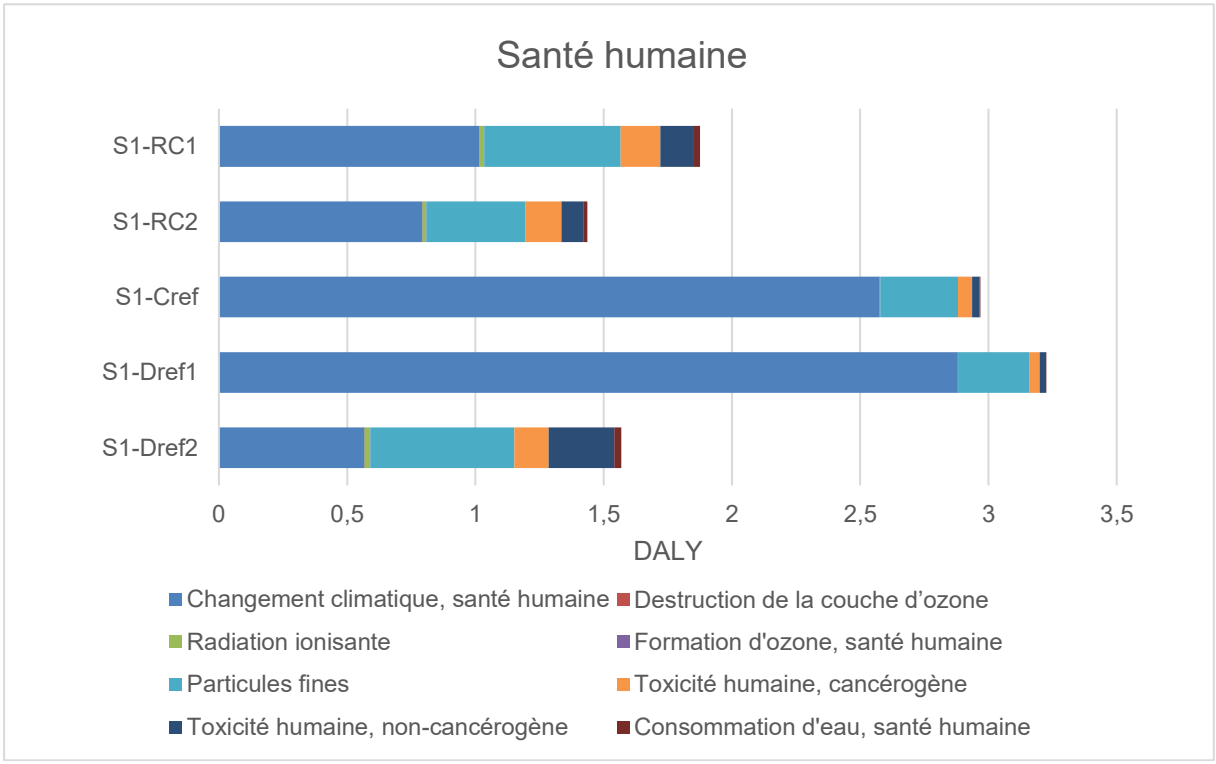


Figure 5-10 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

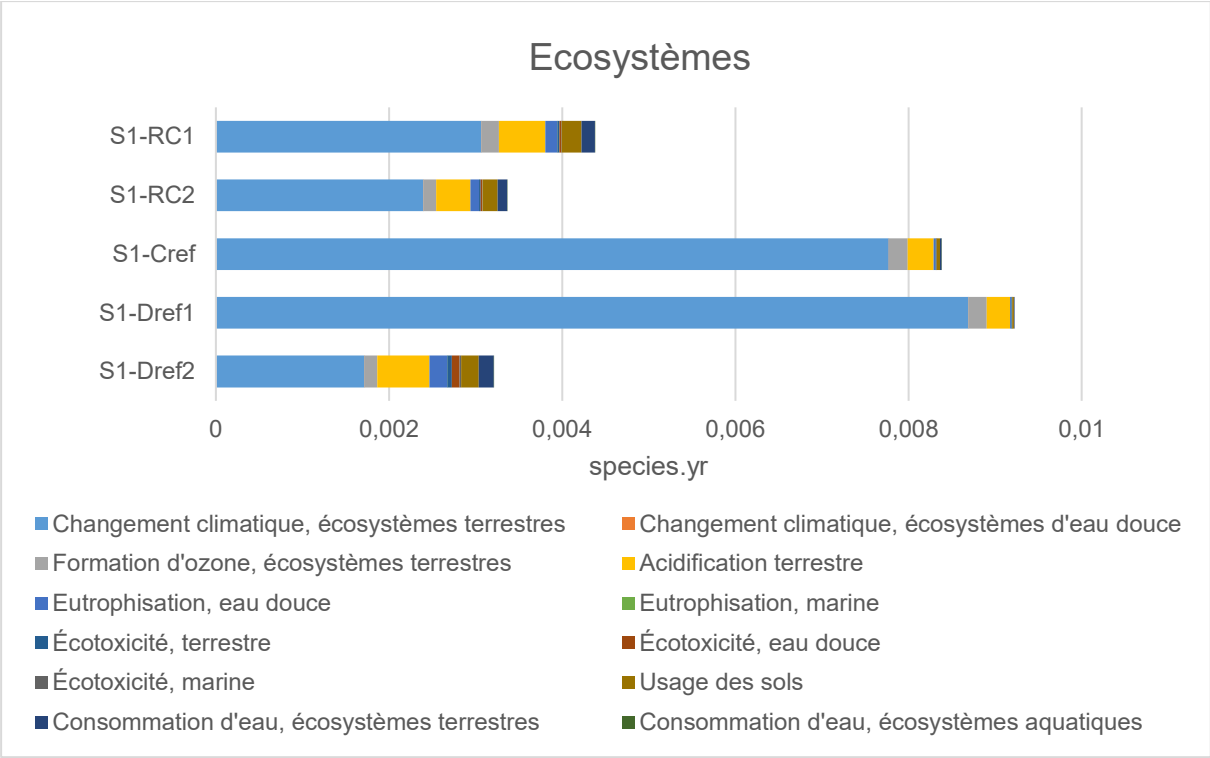


Figure 5-11 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

D'après ces figures, la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes causés par les systèmes comparés dans ce cas d'étude le sont via les impacts sur le changement climatique. Les systèmes à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) sont les plus performants sur cet indicateur, et bien qu'ils soient moins performants sur les indicateurs de particules fines et d'acidification, on peut considérer que ces systèmes causent globalement moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que les systèmes à base de chaudières gaz (S1-Cref et S1-Dref1). Concernant les ressources naturelles, les systèmes à base de chaudières contribuent davantage à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles (via l'utilisation de gaz naturel), là où les systèmes à base de PAC contribuent en France à l'épuisement des ressources en uranium et plus généralement à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Etablir une hiérarchie entre les trois systèmes à base de PAC sur la base des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes est plus délicat. En effet, les écarts sont assez faibles au regard de l'incertitude des modèles.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, **une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

La PAC sur sondes géothermiques du scénario RC1 nécessite l'utilisation de propylène glycol (modélisé comme pétro-sourcé), émettant un impact de l'ordre de 10 % sur certains indicateurs d'impact. Cette quantité de glycol est un élément important de comparaison entre les scénarios RC1 et RC2, une analyse de sensibilité est réalisée sur la conductivité du sol qui agit directement sur la quantité de glycol utilisée dans la solution.

Les groupes froids fonctionnent avec un réfrigérant à faible PRG (potentiel de réchauffement global) peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).
Enfin, pour tester ces hypothèses sur d'autres gammes de température, une sensibilité à plus ou moins 5 degrés a été menée sur la température d'approvisionnement de l'eau.

5.3 Cas d'étude 2

Rappel des configurations des scénarios :

- S2-RC : réseau de chaleur et réseau de froid alimentés par un système de thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique ;
- S2-Cref :
  - réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
  - réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression ;
- S2-Dref1 :
  - chaudières gaz par bâtiment ;
  - groupe froid à compression par bâtiment ;
- S2-Dref2 : thermo-frigo-pompe par bâtiment.

5.3.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 2 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-7 : Cas d'étude 2 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S2-RC	S2-Cref	S2-Dref1	S2-Dref2
Changement climatique	39%	92%	100%	15%
Destruction de la couche d'ozone	23%	30%	100%	26%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	48%	57%	72%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	84%	100%	100%	39%
Particules fines	100%	67%	59%	55%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	73%	57%	51%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	77%	46%	46%
Acidification terrestre et eau douce	100%	78%	84%	64%
Eutrophisation, eau douce	100%	59%	79%	83%
Eutrophisation, marine	100%	92%	91%	56%
Eutrophisation, terrestre	100%	79%	79%	58%
Ecotoxicité, eau douce	100%	73%	57%	56%
Usage des sols	100%	58%	45%	52%
Consommation d'eau	100%	51%	58%	68%
Ressources énergétiques	99%	91%	100%	64%
Ressources minérales et métalliques	79%	57%	100%	89%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire. Le classement entre les scénarios centralisés et décentralisés dépend fortement de l'indicateur considéré. Le scénario Dref2 est le scénario le moins impactant sur 10 indicateurs et le scénario RC le plus impactant sur 11 indicateurs. Il est à ce stade difficile de départager tous les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.3.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 2 sur chacun des impacts endpoint considérés.

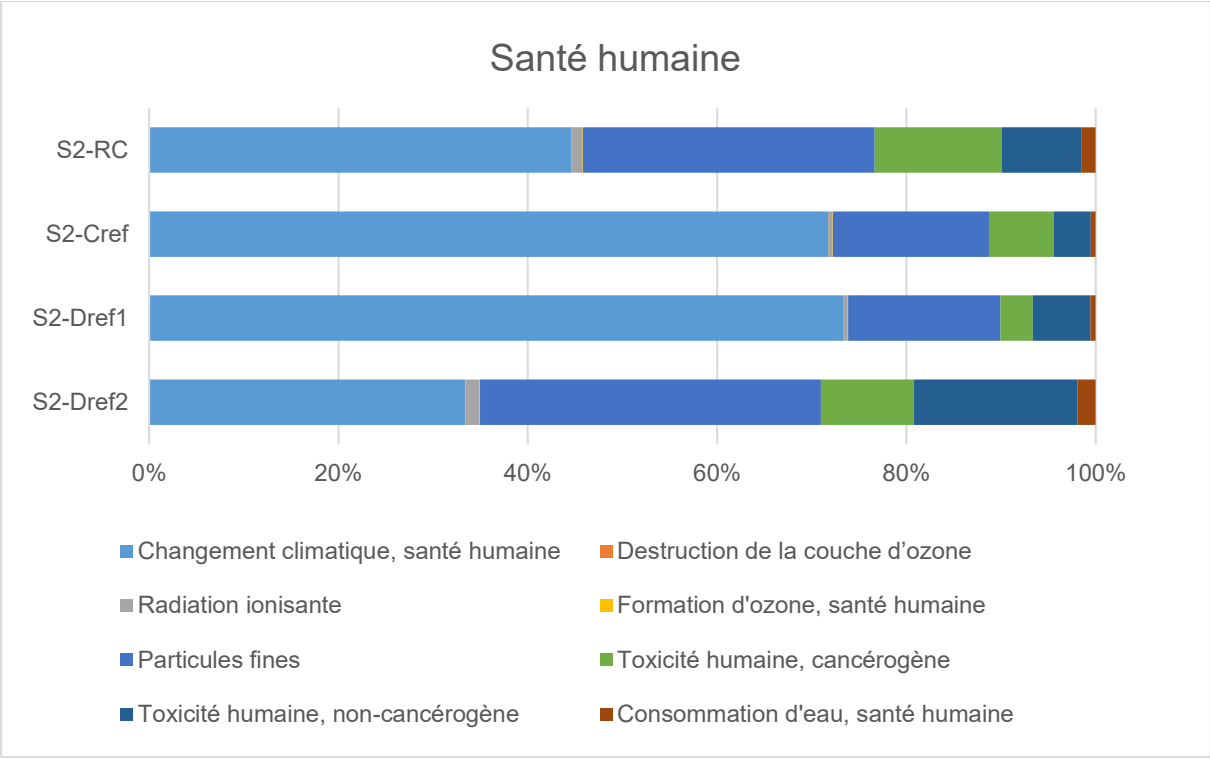


Figure 5-12 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique et aux émissions de particules fines. Suivent dans un second ordre les impacts sur la toxicité humaine.

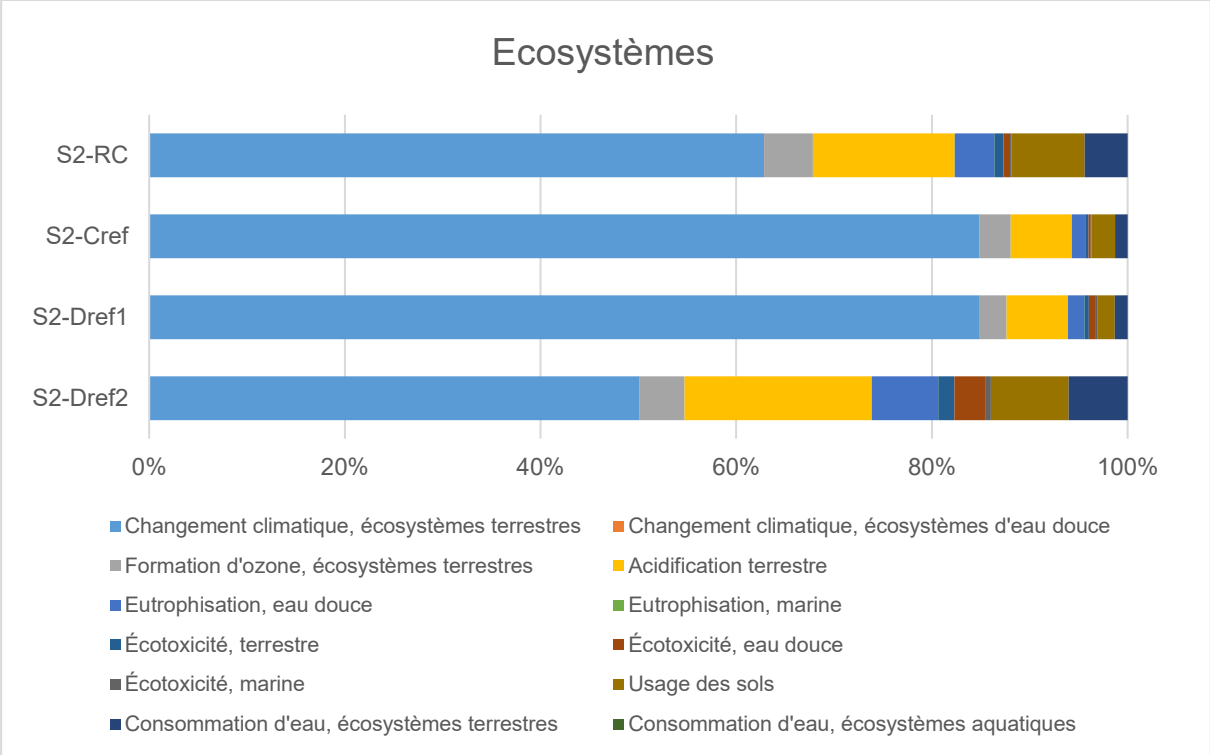


Figure 5-13 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Suivis dans un second ordre par l'indicateur acidification terrestre et dans une moindre mesure les indicateurs d'usage des sols.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 2 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Particules fines ;
- Acidification terrestre et eau douce ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.3.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.3.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 2 sur l'indicateur de changement climatique.

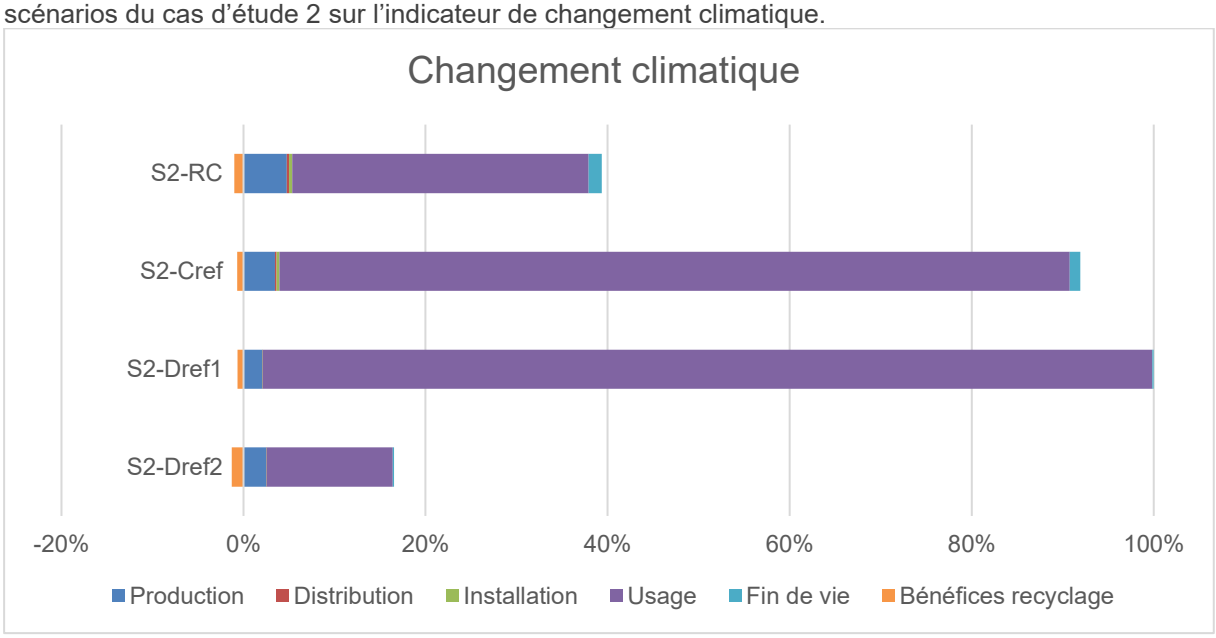


Figure 5-14 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario à base de TFP centralisées (S2-RC) est de l'ordre de deux fois plus performant que les chaudières gaz et groupes froid (S2-Cref et S2-Dref1);
- Le scénario à base de TFP décentralisé (Dref2) est de l'ordre de deux fois plus performant que la TFP centralisée (S2-RC), car pour les TFP centralisées (RC), un appoint est réalisé avec une chaudière gaz pour le besoin de chaleur, qui couvre environ 18 % de la demande de chaleur, mais est responsable d'environ 29 % des émissions GES de la phase d'usage.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 83 % des impacts pour chaque scénario ;

- L'étape de production représente entre 12 et 15 % de l'impact du scénario S2-RC et S2-Dref2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-8 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S2 RC		S2 Cref		S2 Dref1		S2 Dref2	
Emissions liées à la combustion de gaz naturel (appoint)	29%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	73%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	68%	Consommation électrique des TFP	90%
Consommation électrique des TFP	24%						
Consommation électrique des pompes réseaux	18%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	14%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	20%		
Génie civil – production d'acier non allié	9%						

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;
- Les impacts liés à la consommation électrique (TFP et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon dans le mix électrique français ;
- Les impacts liés à la phase de génie civil sont causés par l'utilisation d'acier.

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité de gaz consommée. Les scénarios S2-Cref et S2-Dref1 composés de chaudières gaz sont les scénarios les plus émetteurs de CO_2 eq., causés par la combustion du gaz. Le scénario S2-Dref2 est le scénario le moins impactant sur cet indicateur, car ne nécessite pas d'appoint en gaz fournis par des énergies fossiles. Le gain en efficacité de la TFP centralisée du scénario S2-RC ne permet pas de compenser les pertes réseau et le recours aux systèmes de secours, les TFP décentralisées (S2-Dref2) ont donc une performance supérieure.

Les TFP centralisées ont donc une performance carbone supérieure à celle des chaudières gaz (centralisées et décentralisées), mais inférieure aux TFP décentralisées. Le principal impact du scénario S2-RC vient de l'appoint au gaz et de sa consommation électrique très importante. Le recours au gaz doit être limité au maximum pour en améliorer la performance carbone, par exemple en augmentant la puissance de la PAC.

5.3.3.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 2 sur l'indicateur de particules fines.

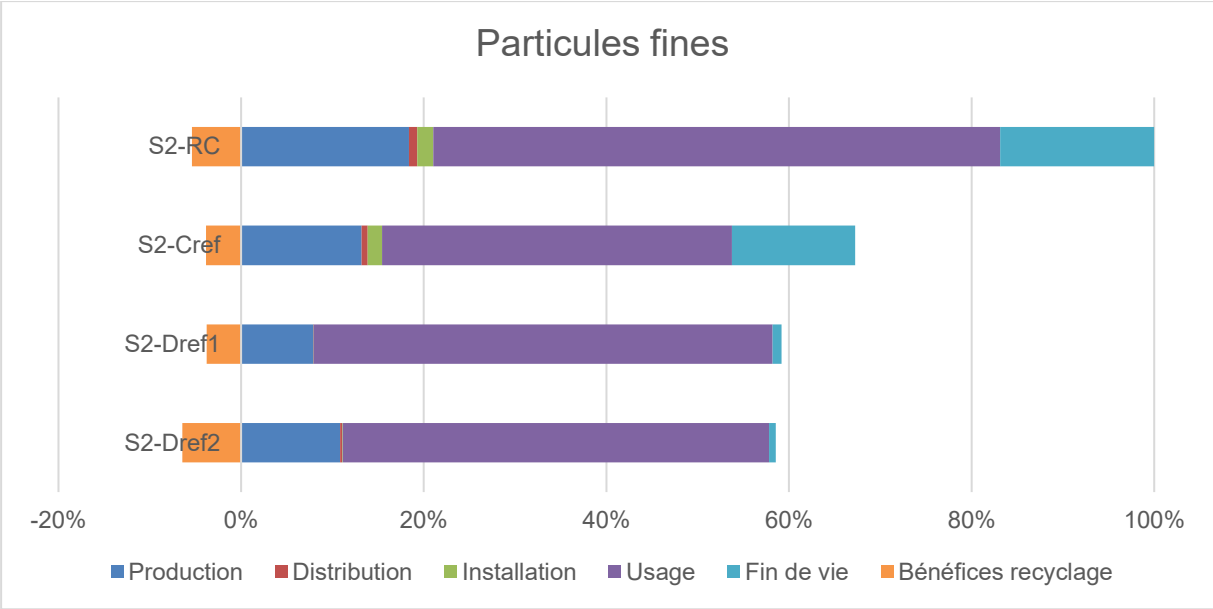


Figure 5-15 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution à base de TFP centralisées sur nappe phréatique (S2-RC) est moins performante que les trois autres solutions ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité au global (notamment pour les pompes réseau) qui émet plus de particules fines que l'utilisation de gaz naturel, et une demande plus importante de métaux/béton dans la phase de génie civil que l'on retrouve sur les étapes d'installation, de production et de fin de vie ;
- Les trois scénarios restants sont équivalents vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 80 à 85 % des impacts du scénario S2-Dref1 et S2-Dref2 et de 57 à 62 % pour les scénarios S2-RC et S2-Cref ;
- L'étape de production représente entre 13 et 20 % de l'impact ;
- Le bénéfice environnemental de la fin de vie permet un gain de 11 % de l'impact du scénario S2-Dref2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-9 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

S2 RC		**S2 Cref**		**S2 Dref1**		**S2 Dref2**	
Consommation électrique des TFP	27%	Consommation électrique du groupe froid	32%	Consommation électrique du groupe froid	67%	Consommation électrique des TFP	89%
Génie civil – démantèlement (14%), production de l'acier (7%), production du béton (4%)	24%	Génie civil – démantèlement (17%), production de l'acier (9%), production du béton (5%)	28%				
Consommation électrique des pompes réseau	23%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	13%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	18%		
Consommation électrique du groupe froid (appoint)	14%	Consommation électrique des pompes réseau	11%				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à l'émission de particules fines lors de la combustion de diesel dans les machines utilisées lors de la phase de démantèlement l'acier en fin de vie et dans les étapes de transport des matériaux vers les sites de traitement ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …).

Conclusion sur l'indicateur de particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz (phase amont) et de la quantité de matériaux utilisée dans la production des réseaux. Le scénario S2-RC se distingue des autres scénarios par une consommation plus importante d'électricité ainsi que d'une phase de génie civil plus émettrice de particules fines vis-à-vis du scénario TFP décentralisé S2-Dref2.

La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doit être limité au maximum pour améliorer la performance du S2-RC sur cet indicateur. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage ou en utilisant un mix électrique contenant moins de biogaz.

5.3.3.3 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 2 sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce.

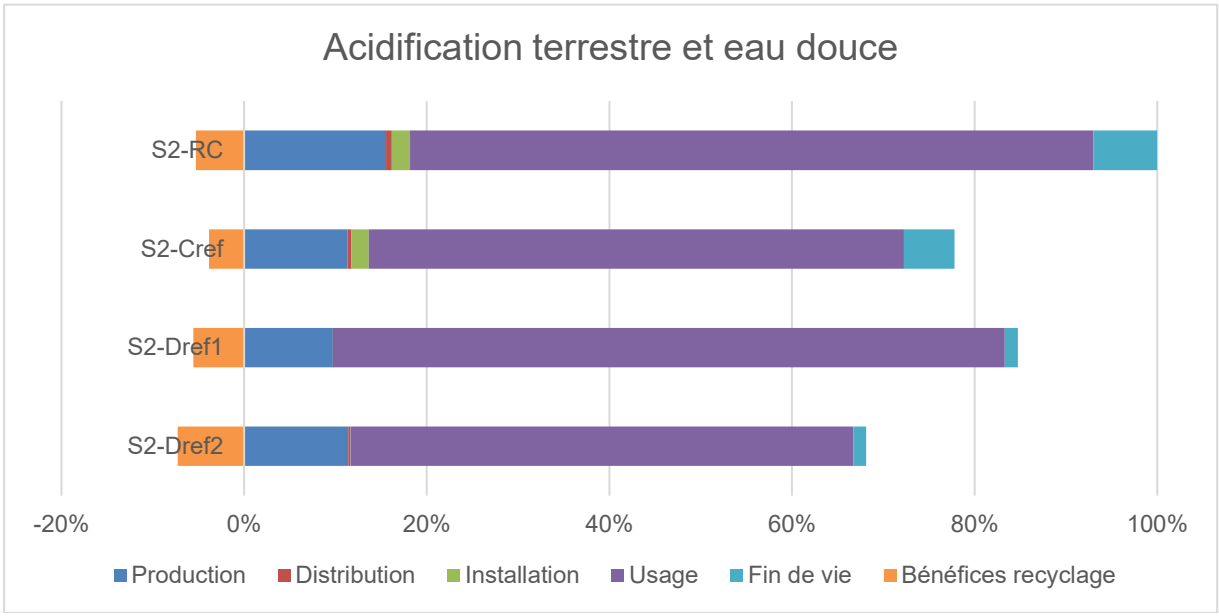


Figure 5-16 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution à base de TFP centralisé (RC) se démarquent des trois autres solutions ;
- La raison principale est une demande plus importante de métaux/béton dans la phase de génie civil que l'on retrouve sur l'étape d'installation, de production et de fin de vie, ainsi qu'une phase d'usage consommant une plus quantité d'électricité que les trois autres systèmes ;
- Les scénarios S2-Cref et S2-Dref1 sont équivalents vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 81 à 87 % des impacts du scénario S2-Dref1 et S2-Dref 2 et de 75 % pour les scénarios S2-RC et S2-Cref ;
- L'étape de production représente entre 11 et 17 % de l'impact ;
- Le bénéfice environnemental de la fin de vie permet un gain de 11 % de l'impact du scénario S2-Dref2 ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-10 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

S2 RC		**S2 Cref**		**S2 Dref1**		**S2 Dref2**	
Consommation électrique des TFP	33%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	32%	Consommation électrique du groupe froid	55%	Consommation électrique des TFP	90%
Consommation électrique des pompes réseau	26%	Consommation électrique du groupe froid	32%				
Consommation électrique du groupe froid (appoint)	15%	Génie civil – démantèlement (17%), production de l'acier (9%), production du béton (5%)	12%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	32%		
Génie civil – démantèlement (5%), production de l'acier (4%), production du béton (3%)	12%	Consommation électrique des pompes réseau	11%				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon (émission de dioxyde de soufre dans l'air) et des centrales à biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) dans le mix électrique français ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'émission de dioxyde souffre et d'oxyde d'azote dans l'air dans la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à l'émission d'oxyde d'azote dans l'air lors de la combustion de diesel dans les machines utilisées lors de la phase de démantèlement de l'acier en fin de vie ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission d'oxyde d'azote dans l'air.

Conclusion sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz (phase amont) et de la quantité de matériaux utilisée dans la production des réseaux. Le scénario S2-RC se distingue des autres scénarios par une consommation plus importante d'électricité ainsi qu'une phase de génie civil plus impactante vis-à-vis du scénario TFP décentralisé S2-Dref2 (identique à l'indicateur de particules fines).

La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doit être limité au maximum pour améliorer la performance du S2-RC sur cet indicateur. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.3.3.4 *Ressources énergétiques*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

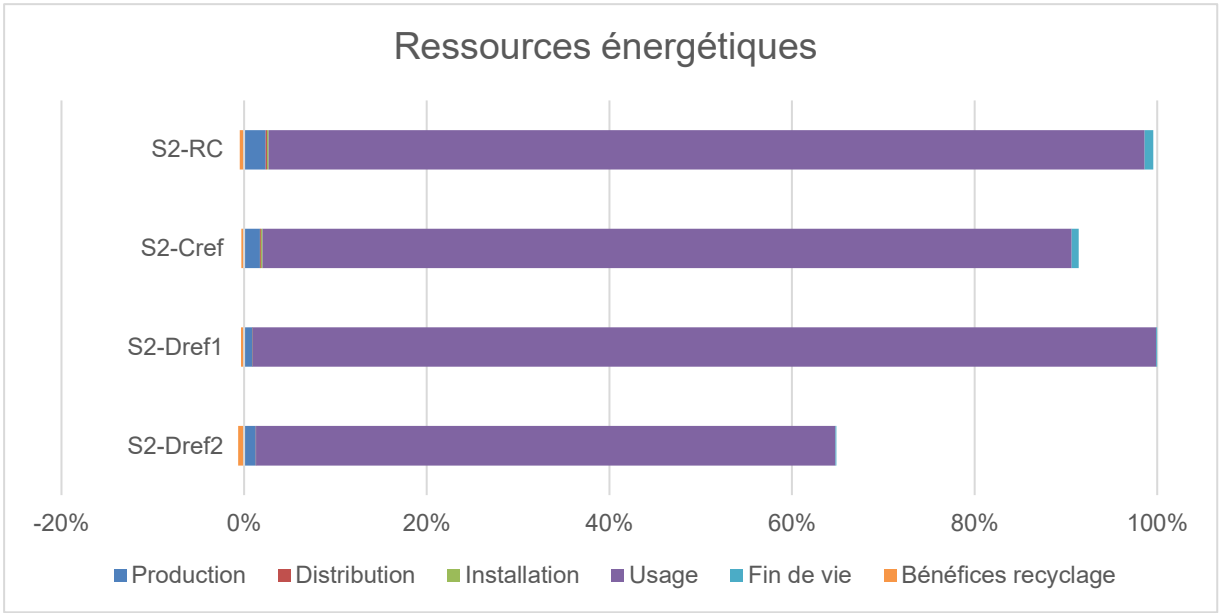


Figure 5-17 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution à base de TFP décentralisé (S2-Dref2) se démarque des trois autres solutions ;
- La raison principale est une consommation plus faible en énergie des TFP décentralisées à l'usage, malgré l'impact plus important de la production d'électricité (nucléaire) que celui de la production de gaz naturel sur l'indicateur ressource ;
- Les trois scénarios restants ne peuvent être départagés vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 96 % des impacts pour chaque scénario ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-11 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

S2 RC		**S2 Cref**		**S2 Dref1**		**S2 Dref2**	
Consommation électrique des TFP	36 %	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	52 %	Consommation électrique des PAC	50 %	Consommation électrique des TFP	99 %
Consommation électrique des pompes réseau	32 %						
Consommation électrique du groupe froid	21 %	Consommation électrique des PAC	35 %	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	49 %		

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'impact de l'extraction du gaz naturel.

Conclusion sur l'indicateur de ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz (phase amont). Le scénario S2-Dref2 se distingue des trois scénarios par une consommation bien plus faible en énergie global, il en est de même du scénario TFP centralisé S2-RC à qui l'on peut également ajouter la différence de l'absence d'appoint en froid et chaud très énergivore. Le scénario S2-RC est équivalent aux deux scénarios avec chaudières gaz/GF, malgré une consommation en énergie globale bien inférieure, mais composé à 70% d'électricité française bien plus impactant sur cet indicateur (lié à l'extraction de l'uranium).

La consommation d'électricité et de gaz pour l'appoint du S2-RC doit être limité au maximum pour en améliorer la performance sur cet indicateur.

5.3.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 2 sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

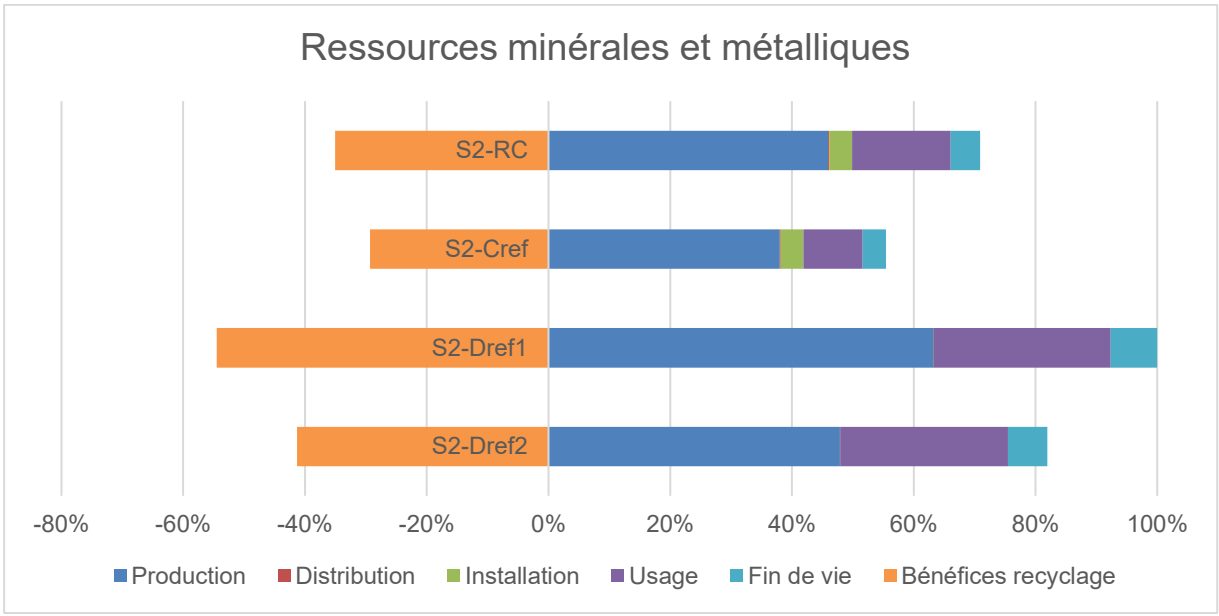


Figure 5-18 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Contrairement à tous les précédents indicateurs, la solution S2-Dref2 n'est plus la solution la moins impactante ;
- Les solutions centralisées (S2-RC et S2-Cref) sont les scénarios qui utilisent le moins de ressources ;
- La solution S2-RC demande tout de même d'investir dans une chaudière et un groupe froid pour assurer l'appoint et le secours, ce qui nécessite aussi des matériaux.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape de production représente entre 58 et 69 % de l'impact ;
- L'étape d'usage représente entre 17 et 34 % de l'impact ;
- Le bénéfice environnemental de la fin de vie permet un gain entre 49 et 55 % de l'impact ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-12 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques.

S2 RC		S2 Cref		S2 Dref1		S2 Dref2	
Consommation électrique des TFP	16 %	Consommation électrique du groupe froid	23 %	Consommation électrique des groupes froid	50 %	Consommation électrique des TFP	63 %
Consommation électrique des pompes réseau	15 %	Production des pompes	12 %				
Consommation électrique du groupe froid (appoint)	12 %	Génie civil	11 %				
Génie civil	10 %	Production du groupe froid	9 %	Production des groupes froid	33 %	Production des TFP	20 %
Production des pompes	9 %	Installation de réseau de froid	8 %				
Production du groupe froid (appoint)	7 %	Production de la cheminée	8 %				
Installation de réseau de froid	6 %	Installation de réseau de chaleur	6 %				
Production de la cheminée	5%	Consommation électrique des pompes réseau	6 %				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de métaux (cuivre, chrome, argent, plomb, cadmium …) dans les différentes composantes du mix français ;
- Les impacts de la production des TFP, groupe froid chaudières, pompes sont causés par l'utilisation de cuivre ;
- Les impacts de la production des cheminées et phase de génie civil sont causés par l'utilisation d'acier.

Conclusion sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent du type de matériaux et de la quantité utilisée, puis dans un second temps la consommation d'électricité. Les scénarios centralisés S2-RC et S2-Cref se distingue des décentralisés grâce à une demande plus faible en matériaux. Le scénario S2-Dref1 composé de chaudière gaz et groupe froid par bâtiment est le scénario le plus impactant, causé par une étape de production nécessitant un plus grand nombre de matériaux.

La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier doit être limité au maximum pour améliorer la performance du scénario S2-RC. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.3.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 2

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 2, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 5 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux

écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	**Systèmes plus performants que le système étudié**	**Systèmes moins performants que le système étudié**	**Principale source de l'impact du système étudié S2-RC**
Changement climatique	Thermo-frigo-pompe par bâtiment (S2-Dref2)	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz et réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression (S2-Cref) Chaudières gaz par bâtiment et groupe froid à compression par bâtiment (S2-Dref1)	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage, dues à l'appoint au gaz naturel
Particules fines	Les trois scénarios	Aucun	Consommation électrique des TFP
Acidification terrestre et eau douce	Les trois scénarios	Aucun	Consommation électrique des TFP
Ressources énergétiques	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz et réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression (S2-Cref) Thermo-frigo-pompe par bâtiment (S2-Dref2)	Aucun (équivalence avec le système S2-Dref1)	Consommation électrique des TFP
Ressources minérales et métalliques	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz et réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression (S2-Cref)	Chaudières gaz par bâtiment et groupe froid à compression par bâtiment (S2-Dref1) Thermo-frigo-pompe par bâtiment (S2-Dref2)	Consommation électrique des TFP

Conclusions tous indicateurs confondus

En considérant uniquement les résultats par indicateur, il est difficile de déterminer quels sont les systèmes qui présentent les meilleures performances environnementales. Les conclusions qu'on peut en tirer dépendent donc fortement de l'importance que le décideur souhaite accorder à chaque indicateur. On peut cependant analyser les résultats obtenus sur les indicateurs endpoint, qui permettent d'évaluer les dommages causés par ces systèmes. Pour permettre de visualiser plus facilement la contribution relative de chaque catégorie d'impact et de comparer les systèmes, les deux graphiques suivants représentent les dommages de chaque système dans leur unité respective. Pour rappel, les modèles endpoint sont très incertains, et il faut des écarts significatifs pour pouvoir établir une hiérarchie. On se gardera donc de donner des conclusions trop tranchées.

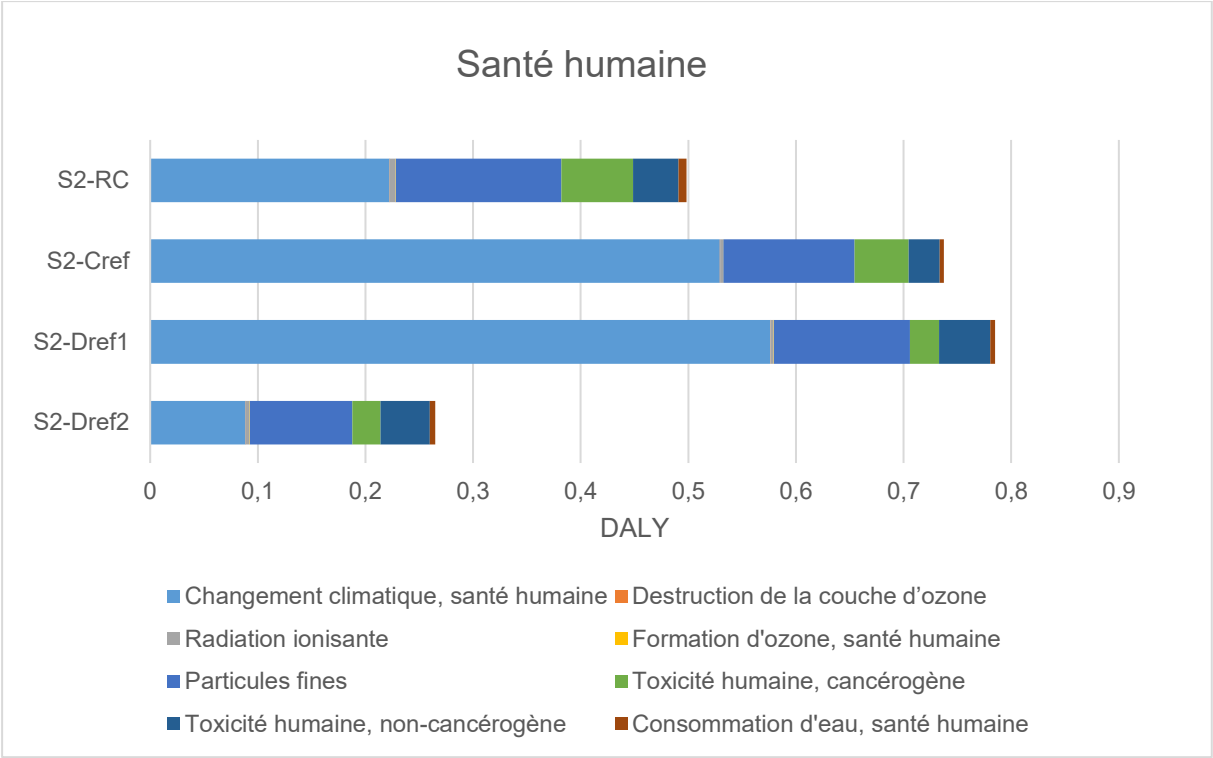


Figure 5-19 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

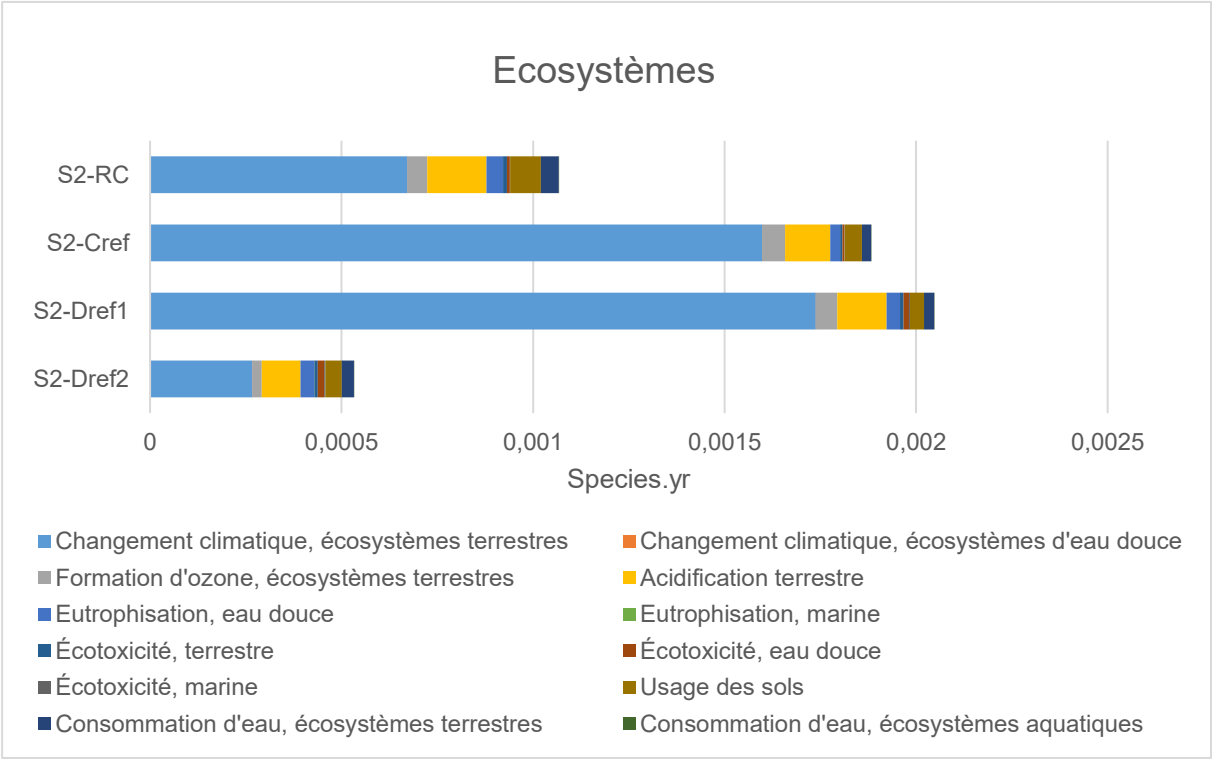


Figure 5-20 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

D'après ces figures, la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes causés par les systèmes comparés dans ce cas d'étude le sont via les impacts sur le changement climatique. Les systèmes à base de TFP (S2-RC et S2-Dref2) sont les plus performants sur cet indicateur, bien que le système S2-RC soit moins performant sur les indicateurs de particules fines et d'acidification, on peut considérer que ces systèmes causent globalement moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que les systèmes à base de chaudières gaz et groupes froid (S2 Cref et S2 Dref1).

Concernant les ressources naturelles, l'impact de la production d'électricité (nucléaire) est plus important que celui de la production de gaz naturel sur l'épuisement des ressources énergétiques. Toutefois, le scénario S2-RC contribuent à même hauteur que les systèmes nécessitant du gaz à l'usage, causé par une consommation électrique très importante. Le système avec TFP décentralisées permet lui d'éviter d'élever cette consommation électrique et permet d'être plus performant sur cet indicateur. Concernant les ressources minérales et métalliques, c'est la mise en réseau qui permet d'obtenir une contribution plus faible sur cet indicateur comparé aux deux solutions décentralisées.

Ce cas d'étude permet d'établir une hiérarchie entre les deux systèmes à base de TFP sur la base des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. En effet, les écarts sont assez importants au regard de l'incertitude des modèles pour montrer l'avantage du scénario à base de TFP décentralisées S2-Dref2. La principale raison de cet écart est que ce système ne nécessite pas de gaz naturel en appoint à l'usage et une consommation électrique au global également plus faible. Départager ce scénario avec les deux scénarios avec chaudières gaz est également possible, en effet mis à part sur l'indicateur de ressource métalliques (avantage de 25% pour le S2-Cref), les trois scénarios sont soit équivalents, soit à l'avantage du S2-Dref 2.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, **une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

Les groupes froids fonctionnent avec un réfrigérant à faible PRG peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).
Enfin, pour tester ces hypothèses sur d'autres gammes de température, une sensibilité à plus ou moins 5 degrés a été menée sur la température d'approvisionnement de l'eau.

5.4 Cas d'étude 3

Rappel des configurations des scénarios :

- S3-RC : réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique ;
- S3-Cref : réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression aérothermie ;
- S3-Dref : groupe froid aérothermique par bâtiment.

5.4.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des trois scénarios du cas d'étude 3 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-13 : Cas d'étude 3 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S3-RC	S3-Cref	S3-Dref
Changement climatique	48%	54%	100%
Destruction de la couche d'ozone	59%	84%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	33%	46%	100%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	50%	52%	100%
Particules fines	45%	47%	100%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	54%	52%	100%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	53%	43%	100%
Acidification terrestre et eau douce	44%	47%	100%
Eutrophisation, eau douce	43%	43%	100%
Eutrophisation, marine	45%	50%	100%
Eutrophisation, terrestre	46%	49%	100%
Ecotoxicité, eau douce	47%	43%	100%
Usage des sols	37%	46%	100%
Consommation d'eau	35%	48%	100%
Ressources énergétiques	34%	47%	100%
Ressources minérales et métalliques	36%	35%	100%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur mais que le scénario S3-Dref est le plus impactant sur chacun des indicateurs sélectionnés. Il est à ce stade difficile de départager tous les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Afin de comprendre ces résultats, les premières analyses réalisées permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, l'analyse de contribution permettra ensuite de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.4.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des trois scénarios du cas d'étude 3 sur chacun des impacts endpoint considérés.

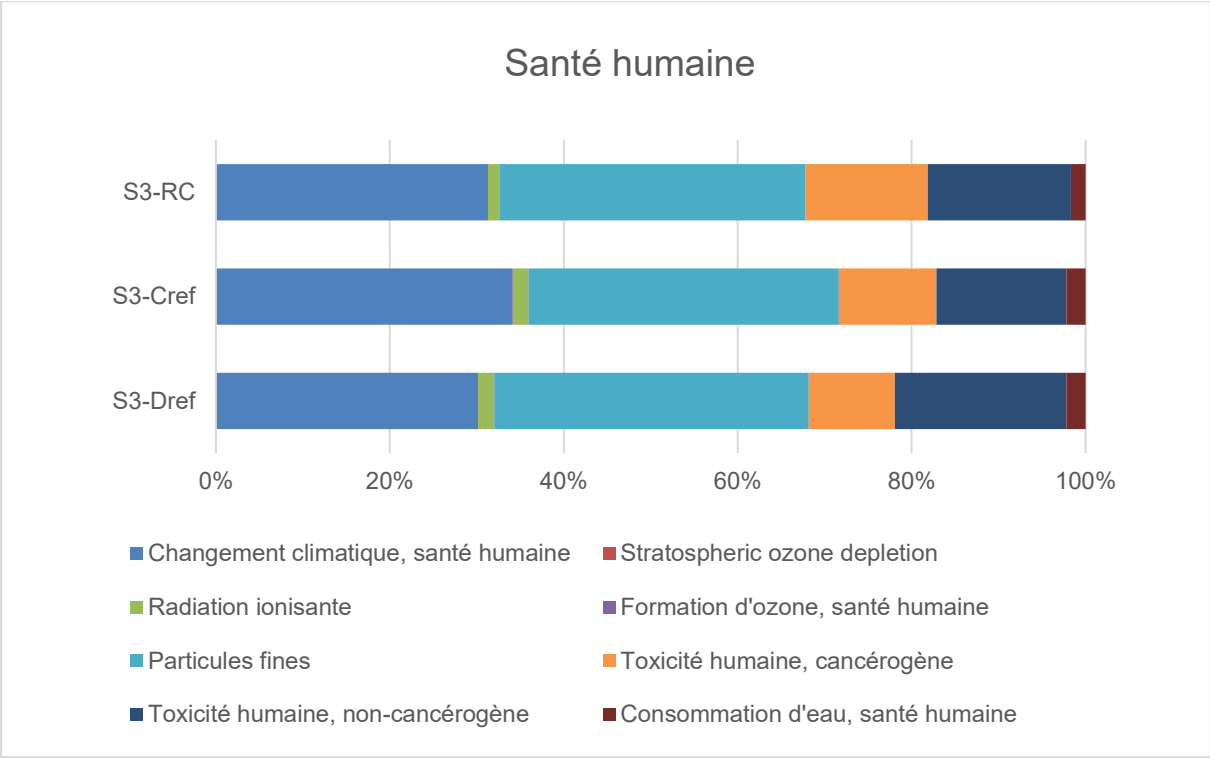


Figure 5-21 : Cas d'étude 3 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts lié aux émissions de particules fines et sur le changement climatique. Suivent dans un second ordre les impacts sur la toxicité humaine.

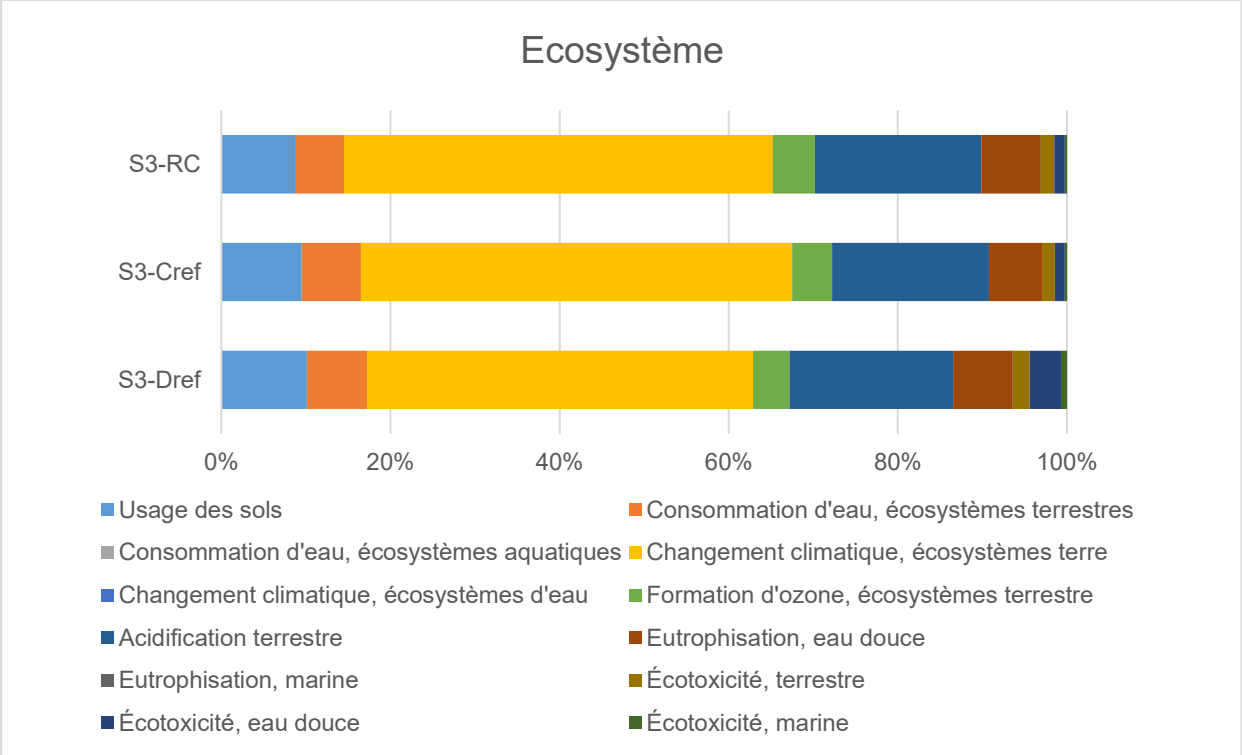


Figure 5-22 : Cas d'étude 3 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Suivis dans un second ordre par l'indicateur d'acidification terrestre et dans une moindre mesure l'indicateur d'usage des sols.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 3 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Particules fines ;
- Toxicité humaine non-cancérigène ;
- Acidification terrestre et eau douce ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.4.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.4.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur de changement climatique.

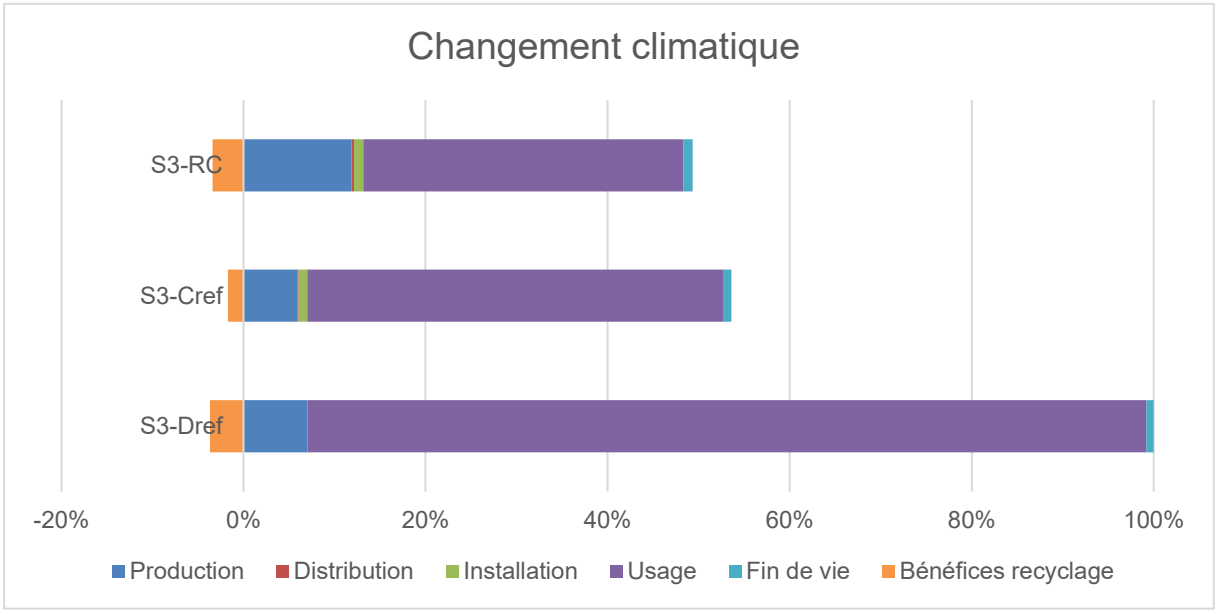


Figure 5-23 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios à base de groupes froid centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont plus performants que le scénario avec groupes froids décentralisés (S3-Dref)
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S3-Dref.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 76 % des impacts pour chaque scénario et jusqu'à 92 % pour le S3-Dref ;
- L'étape de production représente entre 11 et 23 % de l'impact du scénario S3-RC et S3-Cref ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-14 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

<table>
<tr><th colspan="2">S3 RC</th><th colspan="2">S3 Cref</th><th colspan="2">S3 Dref</th></tr>
<tr><td>Consommation électrique des pompes réseau</td><td>50%</td><td rowspan="2">Consommation électrique des GF</td><td rowspan="2">66%</td><td rowspan="3">Consommation électrique des GF</td><td rowspan="3">95 %</td></tr>
<tr><td>Consommation électrique des GFC (à compression)</td><td>14%</td></tr>
<tr><td>Consommation électrique des GFA (à absorption)</td><td>12%</td><td rowspan="2">Consommation électrique des pompes réseau</td><td rowspan="2">22%</td></tr>
<tr><td>Production des sondes 60 m</td><td>6%</td></tr>
</table>

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la consommation électrique (GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon et à gaz dans le mix électrique français ;
- Les impacts liés à la production des sondes sont causés principalement par la consommation d'énergie des procédés de fabrication de l'acier.

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Le scénario S3-Dref composé de groupes froid aérothermiques est le scénario le plus émetteurs de CO_2 eq, causé par l'utilisation des centrales à charbon et centrales à gaz dans le mix électrique français. Les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement inférieurs au scénario décentralisé, notamment grâce à une consommation électrique deux fois inférieure, permettant de compenser une phase de production plus impactante. La différence entre les deux scénarios centralisés est également liée à la consommation électrique (inférieure de 30%), notamment grâce à l'utilisation de chaleur fatale pour le S3-RC.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance carbone supérieure à celle des groupes froids décentralisés. La consommation électrique doit être limitée pour améliorer encore la performance carbone du S3-RC.

5.4.3.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'émission de particules fines.

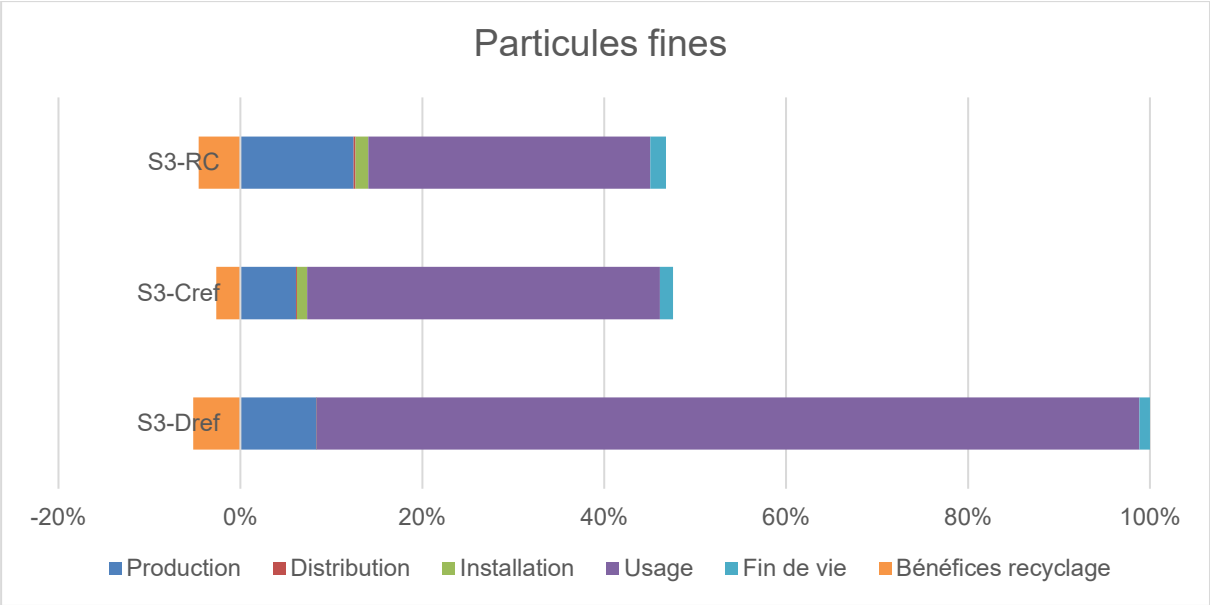


Figure 5-24 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont environ deux fois plus performants que le scénario décentralisé (S3-Dref) ;
- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont équivalent vis-à-vis des incertitudes en ACV
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S3-Dref.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 73 à 86 % de l'impact des scénarios S3-RC et S3-Cref et jusqu'à 95% du scénario Dref ;
- L'étape de production représente de 23 à 26 % de l'impact des scénarios S3-RC et S3-Cref ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-15 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

<table>
<tr><th colspan="2">S3 RC</th><th colspan="2">S3 Cref</th><th colspan="2">S3 Dref</th></tr>
<tr><td>Consommation électrique des pompes réseau</td><td>41%</td><td rowspan="2">Consommation électrique des GF</td><td rowspan="2">67%</td><td rowspan="5">Consommation électrique des GF</td><td rowspan="5">95%</td></tr>
<tr><td>Consommation électrique des GFC</td><td>15%</td></tr>
<tr><td>Consommation électrique des GFA</td><td>10%</td><td rowspan="3">Consommation électrique des pompes réseau</td><td rowspan="3">19%</td></tr>
<tr><td>Production des sondes 60 m</td><td>8%</td></tr>
<tr><td>Perte de réfrigérant à l'utilisation</td><td>7%</td></tr>
</table>

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts liés à la production des sondes sont causés principalement par l'utilisation d'acier ;

- Les impacts liés à la perte de réfrigérant sont causés par l'émission d'ammoniaque dans l'air.

Conclusion sur l'indicateur d'émission particules fines :

Comme pour le changement climatique, les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement inférieurs au scénario décentralisé, notamment par une consommation électrique deux fois inférieure, permettant de compenser les phases de production/installation/fin de vie plus impactantes. La différence entre les deux scénarios centralisés est également liée à une consommation électrique différente (inférieure de 30%), notamment grâce à l'utilisation de la chaleur fatale pour le S3-RC, mais à l'installation de sondes (forage) dans le cas du scénarios S3-RC.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance supérieure à celle des groupes froids décentralisés. Il est nécessaire de réduire la consommation électrique ou d'utiliser un mix électrique contenant moins de biogaz pour améliorer encore la performance du S3-RC.

5.4.3.3 Toxicité humaine, effets non-cancérogènes

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur de toxicité humaine, effets non-cancérogènes.

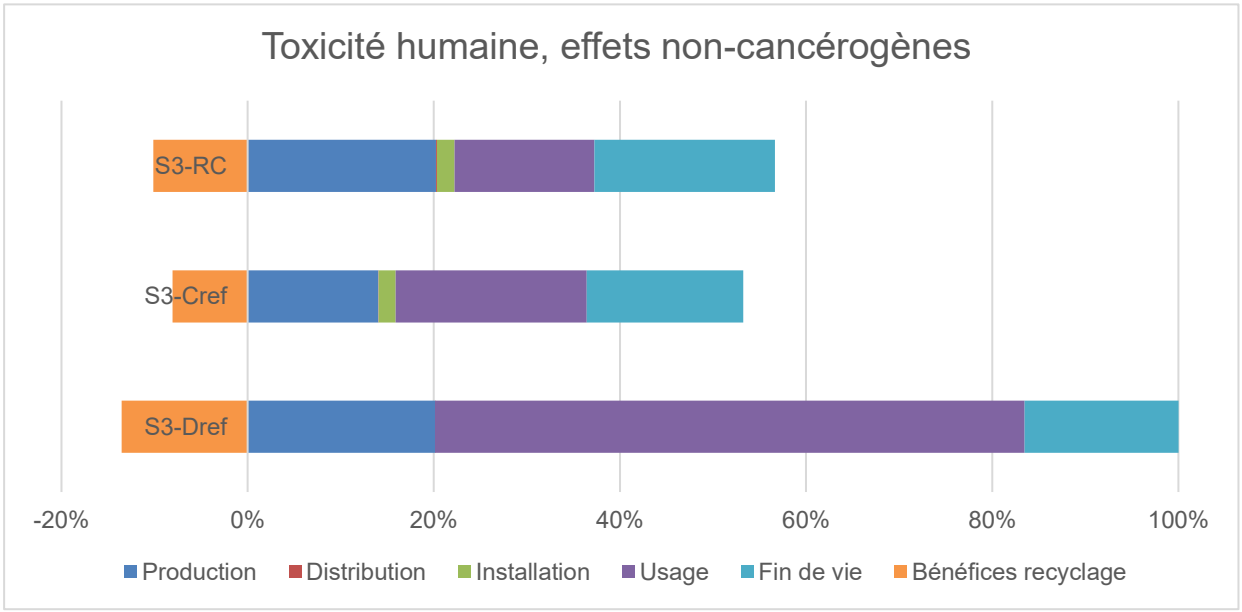


Figure 5-25 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur toxicité humaine, effets non-cancérogènes

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont plus performants que le scénario décentralisé (S3-Dref) ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S3-Dref ;
- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont équivalent vis-à-vis des incertitudes en ACV sur cet indicateur.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage reste l'étape la plus impactante pour le scénario S3-Dref avec 73 %, mais ce n'est plus le cas pour les deux autres scénarios avec une part entre 32 et 45 % ;
- L'étape de production représente entre 23 % et 44 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- L'étape de fin de vie représente entre 17 et 34 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent un gain de 14 % à 18 % sur l'ensemble des scénarios ;

- Les autres étapes, qui contribuent pour moins de 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV pour ce type d'indicateur.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-16 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur toxicité humaine, effets non-cancérogènes

S3 RC		S3 Cref		S3 Dref	
Consommation électrique des pompes réseau	20%	Consommation électrique des GF	35%	Consommation électrique des GF	73 %
Production du transformateur	13%				
Production du GFC	11%	Production des GF	17%		
Production des sondes 60 m	9%	Production du transformateur	14%		
Production du GFA	8%	Consommation des pompes	12%	Production du GF	27%
Consommation électrique des pompes réseau	6%	Consommation électrique des pompes réseau	8%		

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (émissions d'arsenic dans l'eau) et des centrales à charbon (émissions d'arsenic et de mercure dans l'eau) dans le mix électrique français ;
- Les impacts de la production du GF, GF absorption, pompes et transformateur sont liés à l'utilisation du cuivre (émission de zinc dans l'air) ;
- Les impacts de la production du transformateur et des sondes sont liés aux procédés de fabrication de l'acier (émissions de mercure dans l'air) et du cuivre (émissions de zinc dans l'air).

Conclusion sur l'indicateur de toxicité humaine, effets non-cancérogènes :

L'interprétation des indicateurs de toxicité est à prendre avec précaution car le modèle de caractérisation utilisé pour cet indicateur est jugé peu robuste (voir § 3.2.8.1). Les conclusions annoncées montrent donc une tendance sur cet indicateur et ne doivent pas être prises comme uniques éléments de décision.

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. La fin de vie et la production ont un rôle plus important sur la toxicité, cependant c'est le cas sur les trois scénarios. Au global, les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement inférieurs au scénario décentralisé, notamment par une consommation électrique deux fois inférieure, permettant de compenser les phases de production/installation/fin de vie plus impactantes. La différence entre les deux scénarios centralisés est trop faible pour les départager vu la robustesse de cet indicateur.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance supérieure à celle des groupes froids décentralisés. La consommation électrique doit être limitée pour améliorer encore la performance du S3-RC.

5.4.3.4 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce.

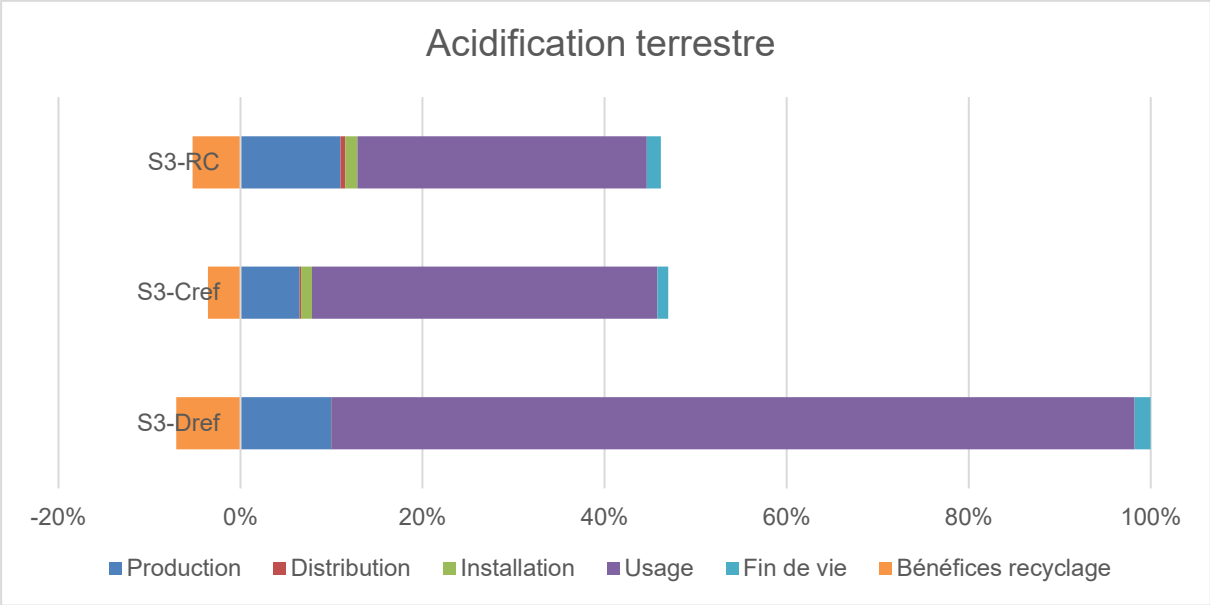


Figure 5-26 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont environ deux fois plus performants que le scénario décentralisé (S3-Dref) ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S3-Dref ;
- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont équivalent vis-à-vis des incertitudes en ACV
- La différence entre les deux scénarios centralisés est de 17 %, ce qui permet de les départager, vis-à-vis des incertitudes en ACV.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 78 à 95 % des impacts pour chaque scénario ;
- L'étape de production représente entre 11 et 27 % des impacts pour chaque scénario ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent un gain de 11 % sur le scénario S3-RC ;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-17 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

S3 RC		**S3 Cref**		**S3 Dref**	
Consommation électrique des pompes réseau	44%	Consommation électrique des GF	67%	Consommation électrique des GF	95%
Consommation électrique des GFC	14%				
Consommation électrique des GFA	11%	Consommation électrique des pompes réseau	21%		
Perte réfrigérant pendant l'utilisation	8%				
Production des sondes 60 m	5%				

Les analyses de ces différents procédés ont permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon (émission de dioxyde de soufre dans l'air) et des centrales à biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) dans le mix électrique français ;
- Les impacts de la perte de réfrigérant sont causés par l'émission d'ammoniac dans l'air ;
- Les impacts de la production des sondes sont liés à l'utilisation d'acier (émissions de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote l'air).

Conclusion sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement moins impactant au scénario décentralisé, notamment par une consommation électrique deux fois inférieure, permettant de compenser les phases de production/installation plus impactantes. La différence entre les deux scénarios centralisés est également liée à une consommation électrique différente (inférieure de 30%), notamment grâce à l'utilisation de la chaleur fatale pour le S3-RC.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance supérieure à celle des groupes froids décentralisés. La consommation électrique doit être limité pour améliorer encore la performance du S3-RC.

5.4.3.5 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

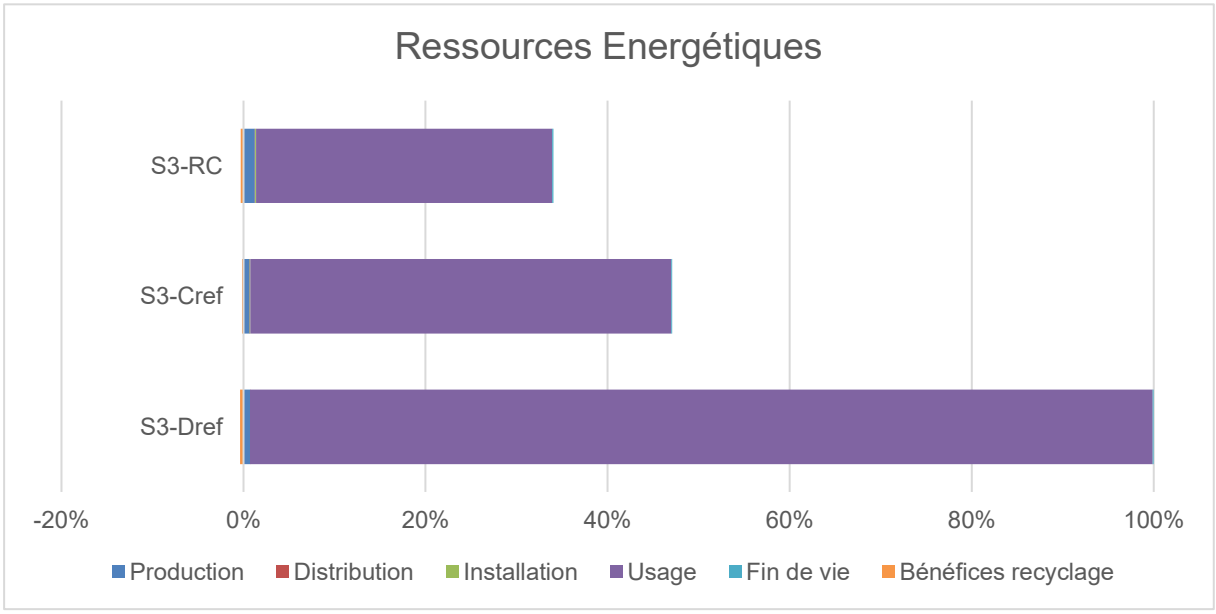


Figure 5-27 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :
- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont environ deux fois plus performants que le scénario décentralisé (S3-Dref) ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S3-Dref.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :
- L'étape d'usage est responsable de plus de 96 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-18 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

S3 RC		S3 Cref		S3 Dref	
Consommation électrique des pompes réseau	59 %	Consommation électrique des GF	77%	Consommation électrique des GF	99%
Consommation électrique des GFC	23 %	Consommation électrique des pompes réseau	21%		

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement inférieurs au scénario décentralisé, notamment par une consommation électrique deux fois inférieur. La différence entre les deux scénarios centralisés est également liée à une consommation électrique différente (inférieure de 30%), notamment grâce à l'utilisation de la chaleur fatale pour le S3-RC.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance supérieure à celle des groupes froids décentralisés. La consommation électrique doit être limitée pour améliorer encore la performance du S3-RC.

5.4.3.6 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques.

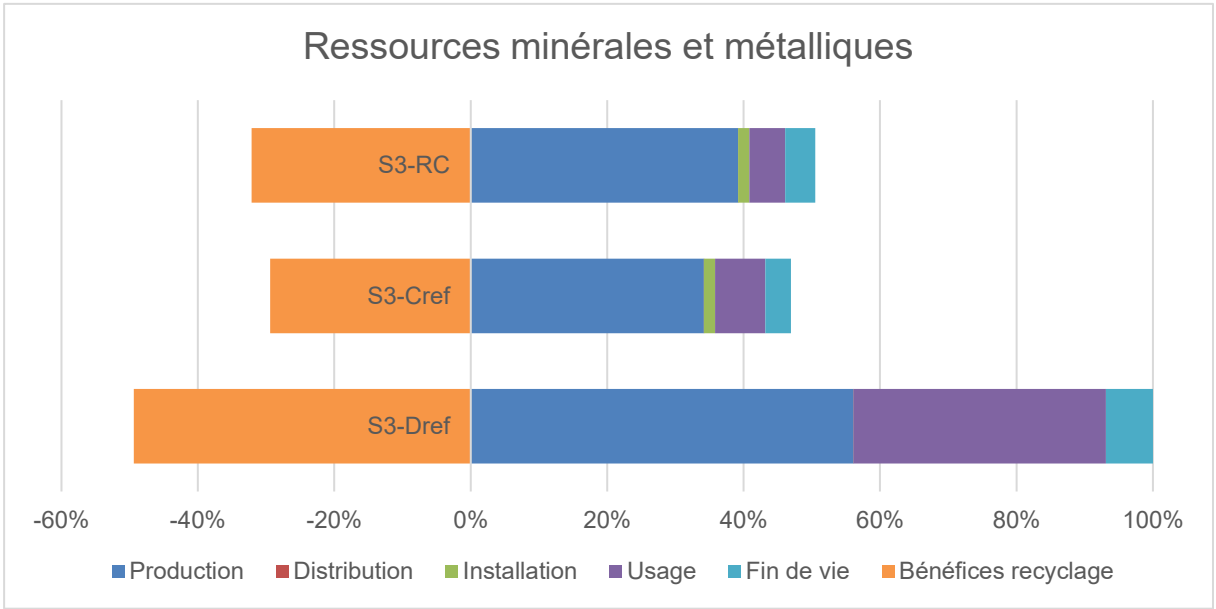


Figure 5-28 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont environ deux fois plus performants que le scénario décentralisé (S3-Dref) ;
- La phase de production du S3-Dref est supérieur à elle seule de l'impact du cycle de vie complet des deux autres scénarios ;
- Les solutions centralisées (S3-RC et S3-Cref) sont les scénarios qui utilisent le moins de ressources et le moins d'énergie ;
- Les scénarios centralisés (S3-RC et S3-Cref) sont équivalent vis-à-vis de l'incertitude en ACV ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape de production est responsable de 57 % de l'impact du scénario S3-Dref et de 73 à 77 % pour les deux scénarios restants ;
- L'étape d'usage est responsable de 11 à 36 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter entre 50 et 65 % de l'impact des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-19 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

S3 RC		S3 Cref		S3 Dref	
Consommation électrique des pompes réseau	14%	Consommation électrique des GFA	31%	Consommation électrique des GF	71%
Production des transformateurs	14%				
Production des GFC	11%	Production des GF	18%		
Production des sondes 60 m	9%				
Production des pompes	9%	Production des transformateurs	15%		
Installation du réseau de froid	9%	Production des pompes	13%	Production des GF	27%
Production des GFA	8%	Installation de réseau de froid	9%		
Consommation électrique des GF	8%				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent dans les différentes étapes du procédé ;
- Les impacts de la production du GF, GFA, pompes et transformateur sont liés à l'utilisation du cuivre ;
- Les impacts de la production du transformateur sont liés à l'utilisation d'acier ;
- Les impacts de l'installation du réseau de froid sont liés à l'utilisation de cuivre.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Les scénarios centralisés S3-RC et S3-Cref sont nettement inférieurs au scénario décentralisé, notamment par une consommation électrique deux fois inférieur. Cette fois, la phase de production est plus importante sur le scénario S3-Dref, de part une demande en matériaux plus importante pour la production des groupes froids décentralisés. La différence entre les deux scénarios centralisés n'est pas suffisante pour les départager.

Les réseaux de froid centralisés ont donc une performance supérieure à celle des groupes froids décentralisés. La consommation électrique doit être limitée pour améliorer encore la performance du S3-RC.

5.4.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 3

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 3, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour les 6 indicateurs responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	**Systèmes plus performants que le système étudié**	**Systèmes moins performants que le système étudié**	**Principale source de l'impact du système étudié S3-RC**
Changement climatique	Aucun	Les deux scénarios restants : Réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression aérothermie (S3-Cref) Groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref)	Consommation électrique des pompes réseau
Particules fines	Aucun (équivalent au scénario S3-Cref)	Groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref)	
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes			
Acidification terrestre et eau douce			
Ressources énergétiques	Aucun	Les deux scénarios restants : Réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression aérothermie (S3-Cref) Groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref)	
Ressources minérales et métalliques	Aucun (équivalent au scénario S3-Cref)	Groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref)	Consommation électrique des pompes réseau

Conclusions tous indicateurs confondus

Le système S3-RC est plus performant que les systèmes S3-Cref et S3-Dref dans les catégories d'impact changement climatique et épuisement des ressources énergétiques. Pour les autres catégories d'impact, il est équivalent au S3-Cref. Le réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique est donc plus performant que le réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression aérothermie sur ces deux impacts et les systèmes centralisés en général sont plus performants que les groupes froid aérothermiques par bâtiment. Dans les trois scénarios, ce sont les consommations électriques qui sont les contributeurs les plus importants pour les impacts étudiés (pompes réseaux ou groupes froid).

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique avec un Mix par usage « climatisation » peu carboné (issu du mix par usage « industrie ») et un mix par usage « chauffage » pour la sensibilité d'un mix très fossile et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

Le groupe à absorption du S3-RC fonctionne avec de l'énergie fatale extérieure, considérée ici comme gratuite au vu du coefficient B pris à 1. Il serait intéressant d'analyser l'évolution des conclusions avec une variation de ce coefficient B, notamment selon les préconisations de PEF (à 0).

Les groupes froids fonctionnent avec un réfrigérant à faible PRG peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).
Enfin, pour tester ces hypothèses sur d'autres gammes de température, une sensibilité à plus ou moins 5 degrés a été menée sur la température d'approvisionnement de l'eau.

5.5 Cas d'étude 4

Pour rappel, les configurations du cas d'étude 4 sont les suivantes :

- Système renouvelable centralisé (S4-RC) : Réseau de chaleur alimenté par une centrale solaire thermique avec capteur double vitrage et stockage inter saisonnier ;
- Système de référence centralisé (S4-Cref) : Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- Système de référence décentralisé 1 (S4-Dref1) : Chaudières gaz par bâtiment ;
- Système de référence décentralisé 2 (S4-Dref2) : Capteur solaire thermique par bâtiment avec appoint gaz.

5.5.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 4 sur chacun des impacts midpoint considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-20 : Cas d'étude 4 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S4-RC	S4-Cref	S4-Dref1	S4-Dref2
Changement climatique	21%	90%	100%	66%
Destruction de la couche d'ozone	25%	98%	100%	68%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	47%	2%	5%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	52%	96%	100%	75%
Particules fines	100%	55%	42%	48%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	21%	13%	27%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	20%	11%	22%
Acidification terrestre et eau douce	84%	100%	89%	76%
Eutrophisation, eau douce	100%	29%	19%	44%
Eutrophisation, marine	69%	100%	88%	74%
Eutrophisation, terrestre	72%	100%	85%	68%
Ecotoxicité, eau douce	100%	24%	15%	27%
Usage des sols	100%	21%	11%	29%
Consommation d'eau	100%	43%	17%	49%
Ressources énergétiques	36%	100%	97%	65%
Ressources minérales et métalliques	100%	32%	28%	57%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire. Le classement entre les scénarios centralisés et décentralisés dépend fortement de l'indicateur considéré. Le scénario S4-Dref2 n'est sur aucun indicateur le scénario le plus impactant. Les scénarios S4-RC et S4-Dref1 ont la particularité d'opposer leurs impacts, le scénario Dref1 est le scénario le moins impactant sur 12 indicateurs, cependant il est le scénario le plus impactant sur l'indicateur de changement climatique et de formation d'ozone, au contraire du scénario S4-RC.

Il est à ce stade difficile de départager les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.5.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 4 sur chacun des impacts endpoint considérés.

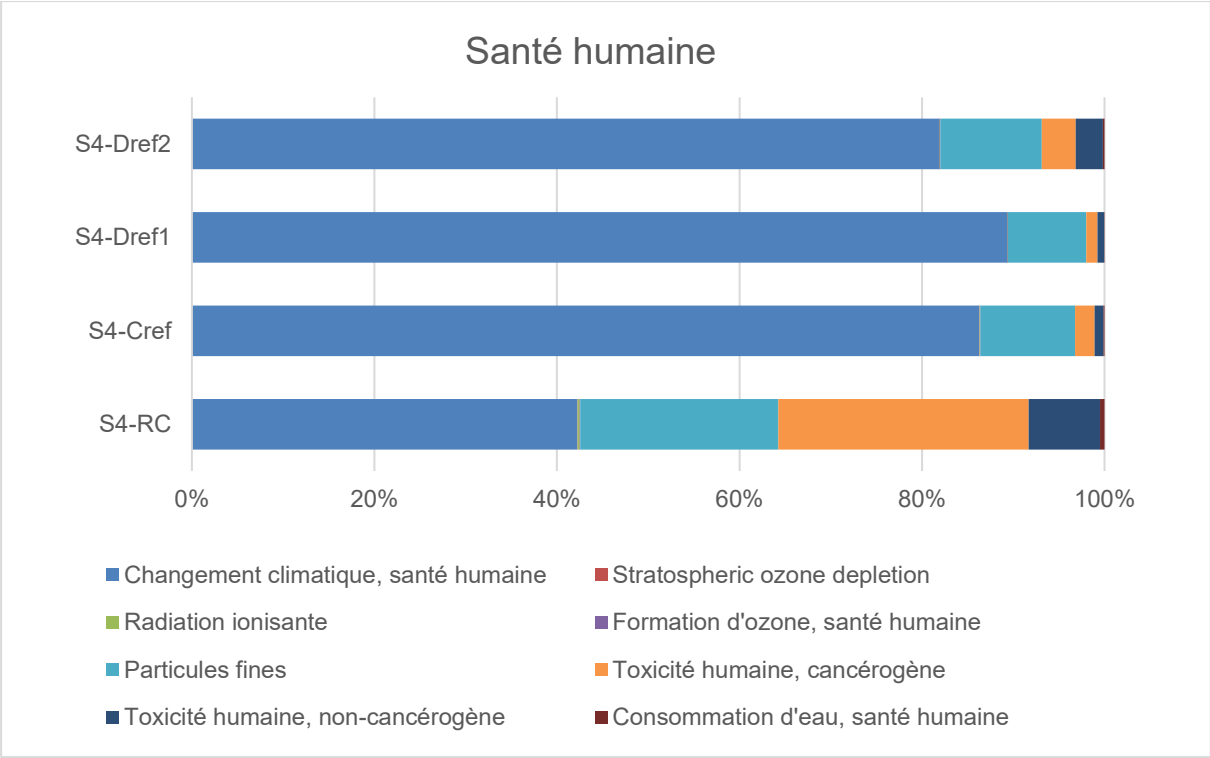


Figure 5-29 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Le scénario S4-RC montre cependant une contribution de 27 % de l'indicateur de toxicité humaine (effets cancérogènes) et de 22 % de particules fines.

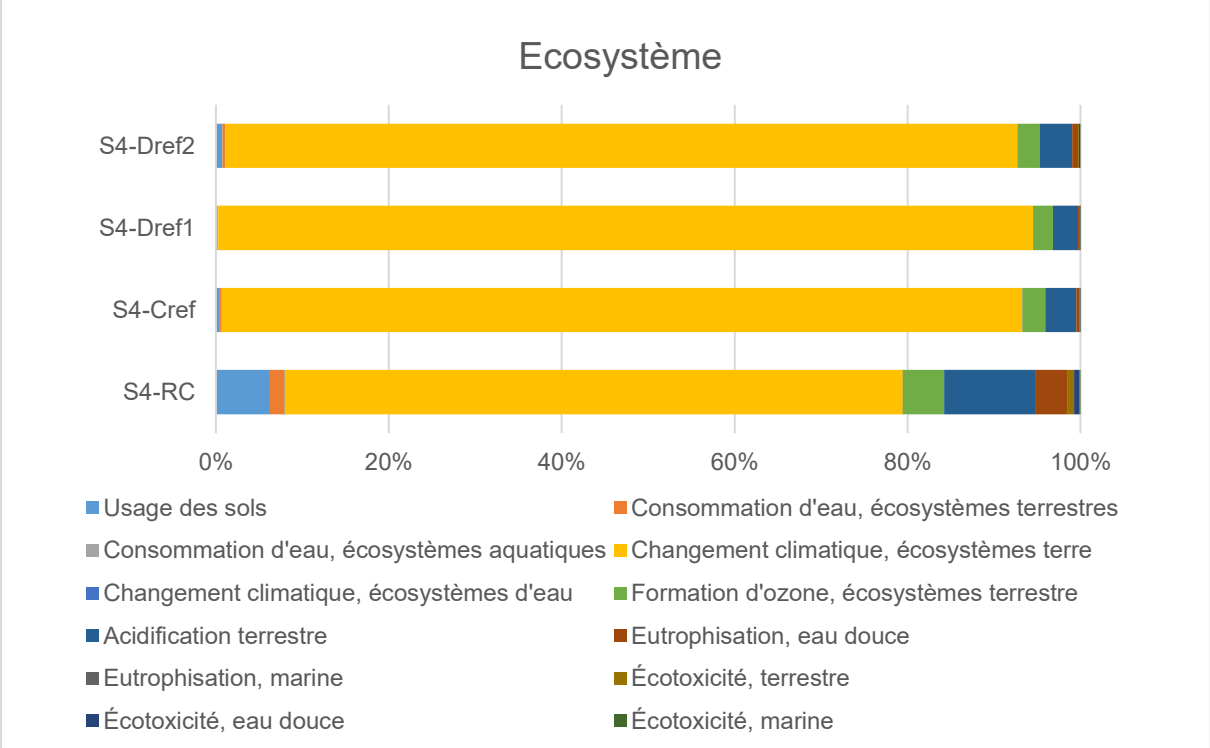


Figure 5-30 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique suivis dans une moindre mesure des indicateurs d'occupation des terres et d'acidification.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 4 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Toxicité humaine (effets cancérogènes) ;
- Particules fines ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.5.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.5.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 4 sur le changement climatique.

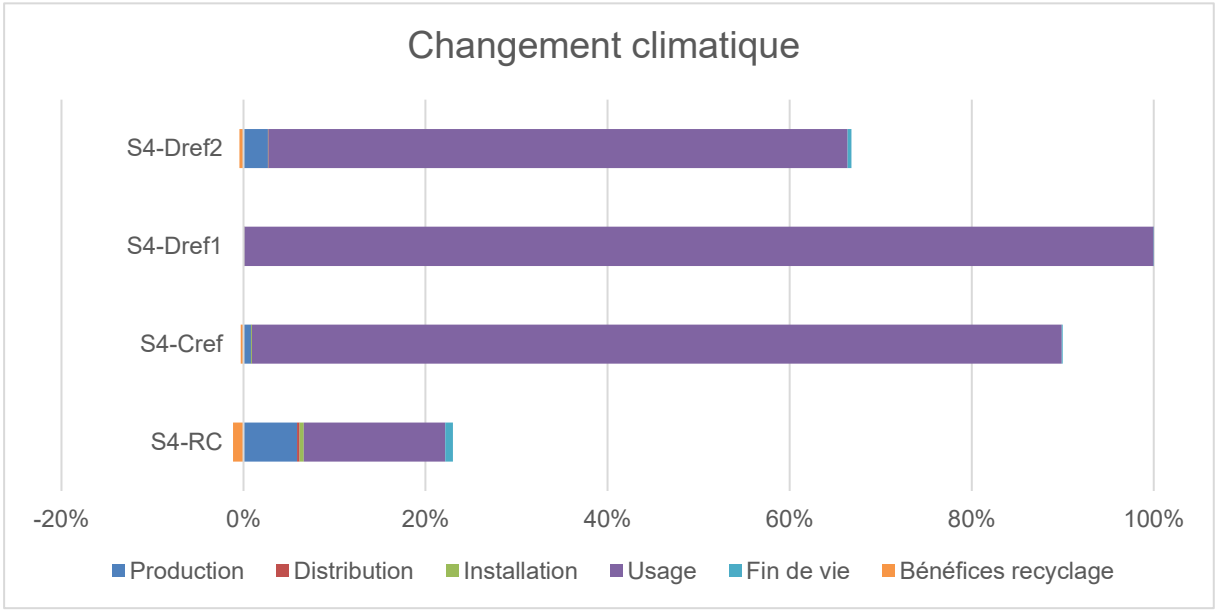


Figure 5-31 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario S4-RC à base de capteurs solaires est environ quatre fois plus performant que les scénarios basés sur des chaudières gaz (S4-Cref et S4-Dref1) ;
- Le scénario solaire décentralisé est deux fois moins performant que le scénario solaire centralisé car sa couverture solaire est moindre, en raison de sa faible capacité de stockage

(intersaisonnier pour S4-RC) : il compense par un complément important en gaz naturel, responsable de la majorité de l'impact sur le réchauffement climatique.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 90 % des impacts pour les scénarios basés sur des chaudières gaz. Le scénario centralisé présente une partie « production » plus importante due aux installations de secours ainsi qu'aux installations de cheminées et de pont roulant.
- L'étape de production est importante pour les scénarios solaires, représentant 25% pour le S4-RC;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-21 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Emissions liées à la consommation de gaz naturel pour la production d'ECS	35%	Emissions liées à la combustion du gaz	82%	Emissions liées à la combustion du gaz	78%	Emissions liées à la combustion du gaz	74%
Emissions liées à la consommation de gaz naturel pour le réseau	15%						
Emissions liées à la consommation électrique	10%						
Emissions liées à la distribution du gaz en amont	10%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	16%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	22%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	21%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;
- Les impacts liés à la production des panneaux solaires sont causés principalement par l'extraction et la transformation de l'aluminium.

Pour le scénario S4-RC, les émissions liées au changement climatique proviennent majoritairement de la consommation de gaz (approvisionnement et combustion) mais sont aussi très liées à la production des installations de stockage (10% des impacts).

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité de gaz consommée. Les scénarios S4-Cref et S4-Dref1 composés de chaudières gaz sont les scénarios les plus émetteurs de CO_2 eq., causés par la combustion du gaz. Les scénarios solaires (S4-RC et S4-Dref2) demandent de mettre en œuvre davantage de matériaux à la fois pour la production solaire (capteurs), pour le circuit primaire d'eau glycolée en sortie de capteurs et enfin pour les stockages. Cependant, la récupération d'énergie gratuite compense largement la quantité de gaz nécessaire pour produire la même quantité de chaleur, ce qui amène à une meilleure performance carbone des scénarios solaires. Le scénario RC est le scénario le moins impactant sur cet

indicateur, malgré une infrastructure bien plus importante, car il possède une couverture solaire forte, et donc peu de complément en gaz naturel.

Les scénarios solaires ont donc une performance carbone supérieure à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S4-RC et S4-Dref2 viennent de l'appoint au gaz. Le recours au gaz doit être limité au maximum pour améliorer leur performance carbone.

5.5.3.2 Toxicité humaine, effets cancérogènes

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 4 sur la toxicité humaine, effets cancérogènes.

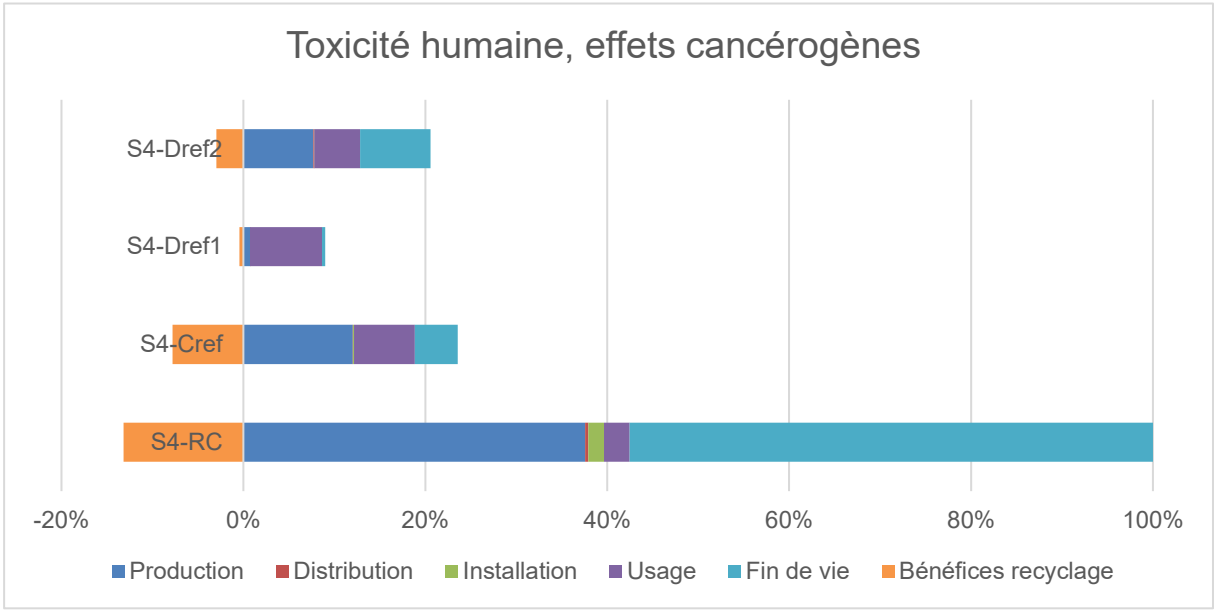


Figure 5-32 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse du changement climatique, la solution solaire centralisée S4-RC a des impacts plus importants que les chaudières gaz et les scénarios décentralisés;
- La raison principale est une demande plus importante de métaux type aluminium (due à la boue rouge qui est un déchet produit lors de la fabrication d'alumine) dans les panneaux ou acier dans les éléments de stockage (ballons) que l'on retrouve sur les étapes de production et de fin vie;
- Les différences ne sont pas assez significatives entre les scénarios S4-Cref et S4-Dref2 pour établir une hiérarchie.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 93 % des impacts pour le scénario Dref1 et de 42% pour le Cref mais de seulement 29% pour Dref2 et négligeable pour S4-RC ;
- L'étape de production représente entre 44 et 76 % des scénarios S4-RC, S4-Dref2 et S4-Cref et est négligeable pour le S4-Dref1 ;
- L'étape de fin de vie représente entre 20 et 50 % sur les scénarios S4-RC, S4-Dref2 et S4-Cref et est négligeable pour le S4-Dref1;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter 13 % de l'impact du scénario S4-RC et 33% pour le S4-Créf;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet d'identifier les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-22 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Emissions liées à la production des installations de stockage temporaire (ballons)	40%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	36%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	87%	Emissions liées à la production des installations de circulation d'eau	48%
Emissions liées à la production des installations de circulation d'eau	31%	Emissions liées à la construction de la cheminée (inox)	28%			Emissions liées à la distribution du gaz en amont	28%
Emissions liées à la production des panneaux solaires	7%	Emissions liées à la chaudière	10%			Emissions liées à la production des panneaux solaires	10%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts des installations de stockage temporaires ou de circulation d'eau sont principalement liés à la production d'acier faiblement allié qui émet en grande quantité du chrome VI dans l'eau lors de la mise en décharge des scories des fours (97% de l'impact de la production d'acier faiblement allié) ;
- Les impacts de la fin de vie sont directement liés au recyclage de l'acier et au traitement des laitiers pendant le procédé ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) et principalement par la production d'acier comprise dans les infrastructures (chrome VI dans l'eau lors de la mise en décharge des scories) ;
- Les impacts de la production des panneaux solaires proviennent surtout de l'extraction de l'aluminium qui entraine le traitement de boues de bauxite ;
- Les impacts de la production de la cheminée sont une fois encore causés par la production d'acier faiblement allié ;
- Le scénario gaz centralisé présente une infrastructure plus développée que le scénario décentralisé car il inclut un système de secours ainsi que des équipements de traitement des fumées et pont roulant, qui sont faits en acier.

Pour le scénario S4-RC, les émissions liées à la toxicité humaine (effets cancérogènes) proviennent majoritairement des installations nécessitant l'approvisionnement de métaux : l'acier des ballons tampons de stockage provisoire contribue à hauteur de 20% et est aussi contributeur des postes de circulation de l'eau après les capteurs. Enfin, les panneaux solaires sont aussi contributeurs, majoritairement à cause de la consommation d'aluminium (notamment primaire) pour leur production.

Il est important de prendre en considération les incertitudes liées à la méthode de caractérisation mais également à l'inventaire de cycle de vie du scénario S4-RC, extrapolé à partir d'un cas canadien sous une modélisation TRNSYS. Les quantités d'acier pour les stockages intermédiaires ainsi que les circuits ont en effet pu être surdimensionnés ou sous-dimensionnés en appliquant le ratio du « nombre de Drake Landing équivalent » pour obtenir la gamme de demande de chaleur.

Conclusion sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes :

L'interprétation des indicateurs de toxicité est à prendre avec précaution car le modèle de caractérisation utilisé pour cet indicateur est jugé peu robuste (voir § 3.2.8.1). Les conclusions annoncées montrent donc une tendance sur cet indicateur et ne doivent pas être prises comme unique élément de décision. L'analyse de contribution permet de montrer une contribution du chrome et du chrome IV de plus de 80% pour chaque scénario si l'on compte à la fois les émissions dans l'air et dans

l'eau. Dans ces conditions, l'incertitude dans les facteurs de caractérisation pour ce modèle n'a pas d'influence importante sur les conclusions.

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz et surtout de la quantité d'acier utilisée dans la production des systèmes de circulation et de stockage. Le scénario S4-RC a des impacts plus importants, principalement dus à la production d'un nombre plus grand d'équipements solaires. Le scénario RC composé d'un large réseau primaire en acier et d'un grand stockage temporaire en ballon en acier est le scénario le plus impactant.

Le système solaire centralisé (S4RC) a donc une performance inférieure sur cet indicateur par rapport aux autres scénarios. Les principaux impacts de ce système S4-RC viennent des matériaux nécessaires à sa fabrication et sa mise en place. L'utilisation d'acier et d'aluminium doivent être limités au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.5.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 4 sur les particules fines.

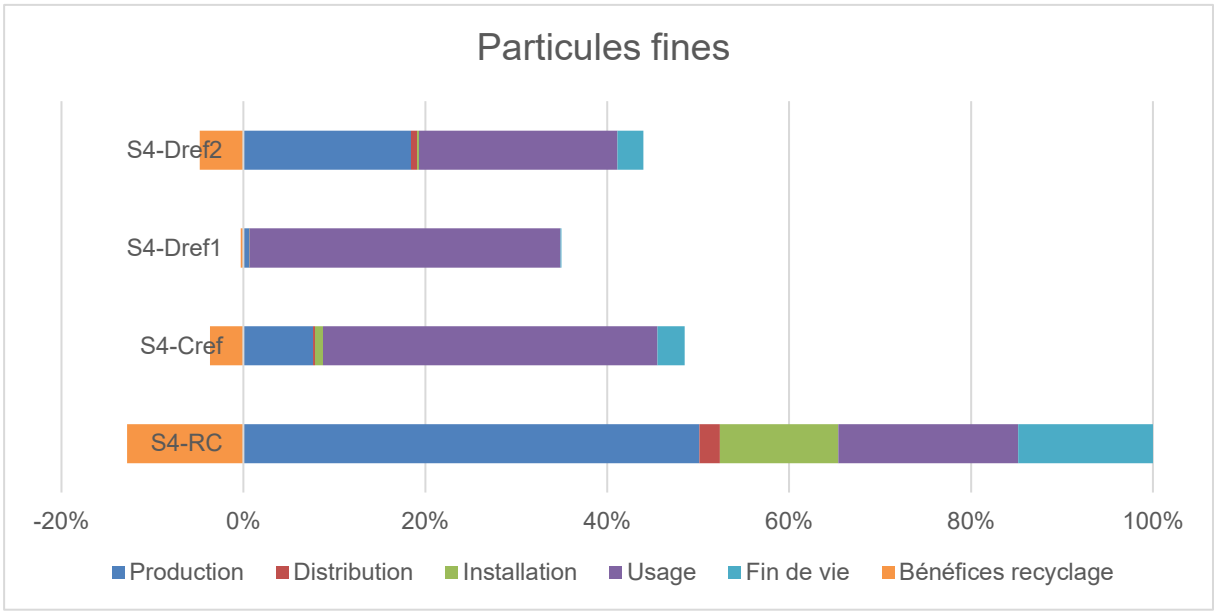


Figure 5-33 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse du changement climatique, la solution solaire centralisée S4-RC a des impacts plus importants que les chaudières gaz et les scénarios décentralisés;
- La raison principale est une demande plus importante de métaux dans les panneaux solaires et les installations de stockage que l'on retrouve sur les étapes d'installation, de production et de fin de vie ;
- Les différences ne sont pas assez significatives entre les scénarios S4-Cref et S4-Dref2 pour établir une hiérarchie.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 82 à 99 % des impacts pour les scénarios basés sur des chaudières gaz (S4-Cref et S4-Dref1) et contribue à hauteur de 25 et 60% pour les scénarios solaires (S4-RC et S4-Dref2) ;
- L'étape de production représente plus de 50 % des scénarios solaires et 17% du scénario de chaudière gaz centralisée (S4-Cref) ;

- L'étape d'installation représente 16% de l'impact total du scénario S4-RC pour la consommation de diesel liée au forage des sondes du BTES ;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-23 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Emissions liées à la production des ballons de stockage et des réseaux en acier	22%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	46%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	74%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	42%
Emissions liées à la consommation d'électricité	18%	Emissions liées à la combustion du gaz naturel	19%			Emissions liées à la production de glycol	21%
Emissions liées aux forages	14%	Consommation électrique des pompes réseaux	17%			Emissions liées à la combustion du gaz naturel	13%
Emissions liées aux circuits	15%			Emissions liées à la combustion du gaz naturel	23%	Emissions liées à la production des panneaux solaires	21%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts des installations à base d'acier proviennent de l'extraction du minerai en Chine qui nécessite l'utilisation de charbon et le traitement de coke et d'agglomérats pour l'électricité
- Les impacts des forages proviennent de la consommation de diesel
- Les impacts des panneaux solaires proviennent notamment de la composante en aluminium, dont l'extraction a nécessité de l'électricité chinoise à base de charbon
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission de particules fines lors de la combustion.

Pour le scénario S4-RC, les émissions liées aux particules fines proviennent majoritairement de la consommation d'acier dans les installations de stockages et les circuits mais sont aussi très liées à la production de panneaux solaires pour 12% (notamment à la production d'aluminium). La consommation d'électricité des pompes du réseau reste un poste important, au même titre que la consommation de diesel responsable du forage des sondes pour le BTES.
Il convient de nouveau de rappeler l'incertitude liée aux données d'inventaire issue de l'extrapolation du modèle Canadien Drake Landing sur les quantités d'acier dans les stockages intermédiaires ou les circuits. Les conclusions sont en effet à moduler au regard de ces incertitudes.

Conclusion sur l'indicateur d'émission particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation de gaz et de la quantité de matériaux utilisés dans la production des réseaux, des panneaux solaires et des installations de stockage.

Le scénario S4-RC se distingue du scénario S4-Dref2 principalement par une consommation plus importante d'acier dans l'infrastructure et une phase d'installation plus importante (forage des sondes). La consommation électrique des pompes du réseau et du circuit primaire impacte également cet indicateur. Le propylène glycol est utilisé comme produit antigel dans les circuits primaires post-capteurs des scénarios solaires.

Le système de référence a donc une performance inférieure sur cet indicateur en comparaison aux chaudières gaz. Les principaux impacts de ce système viennent des matériaux nécessaires à sa fabrication et sa mise en place ainsi que de la consommation électrique. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doivent être limitées au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage ou en utilisant un mix électrique contenant moins de biogaz.

5.5.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 4 sur ls ressources énergétiques.

Cet indicateur prenant en compte les ressources énergétiques non renouvelables uniquement, il est possible de pressentir un avantage des scénarios solaires.

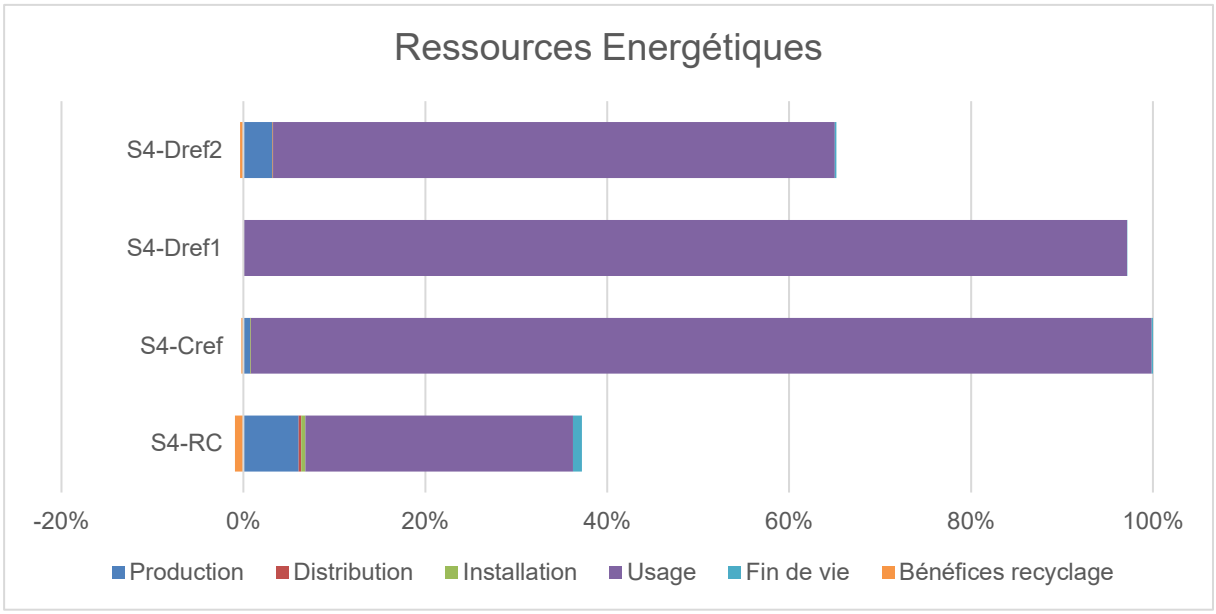


Figure 5-34 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Comme pour le changement climatique, les scénarios solaires sont plus performants (d'un ordre grandeur de 2 fois) que les scénarios basés sur des chaudières gaz ;
- La raison principale est la demande supérieure en énergie finale des solutions avec chaudières gaz qui est palliée par de l'énergie « gratuite » récupérée par les solutions solaires.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 95 % pour tous les scénarios sauf pour le scénario S4-RC pour lequel l'usage contribue à hauteur de 82% ;
- La phase de production est de 17% pour le S4-RC notamment pour la production des panneaux solaires ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuants à l'impacts des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-24 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Consommation d'électricité du système de circulation interne	45%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	91%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	92%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	95%
Emissions liées à la distribution du gaz en amont	37%						
Emissions liées aux installations de stockage	7%						

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique sont causés principalement par l'électricité d'origine nucléaire ;
- Les impacts de la consommation en gaz sont principalement dus à la ressource en gaz

Le scénario S4-RC contribue à l'impact épuisement des ressources énergétiques par sa consommation en électricité, à la fois sur les pompes du réseau interne et sur les pompes du réseau de chaleur de distribution. La consommation en gaz des installations individuelles pour l'ECS et de l'installation centralisée pour le complément des panneaux solaires contribue au total à hauteur de 35% pour cet indicateur.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz. Les solutions S4-Cref et S4-Dref1 ont un impact supérieur de 20 % par rapport aux autres solutions. Le scénario le moins contributeur est le scénario S4-RC pour lequel la couverture solaire est la plus grande.

Les scénarios solaires ont donc une performance supérieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz.

5.5.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 4 sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

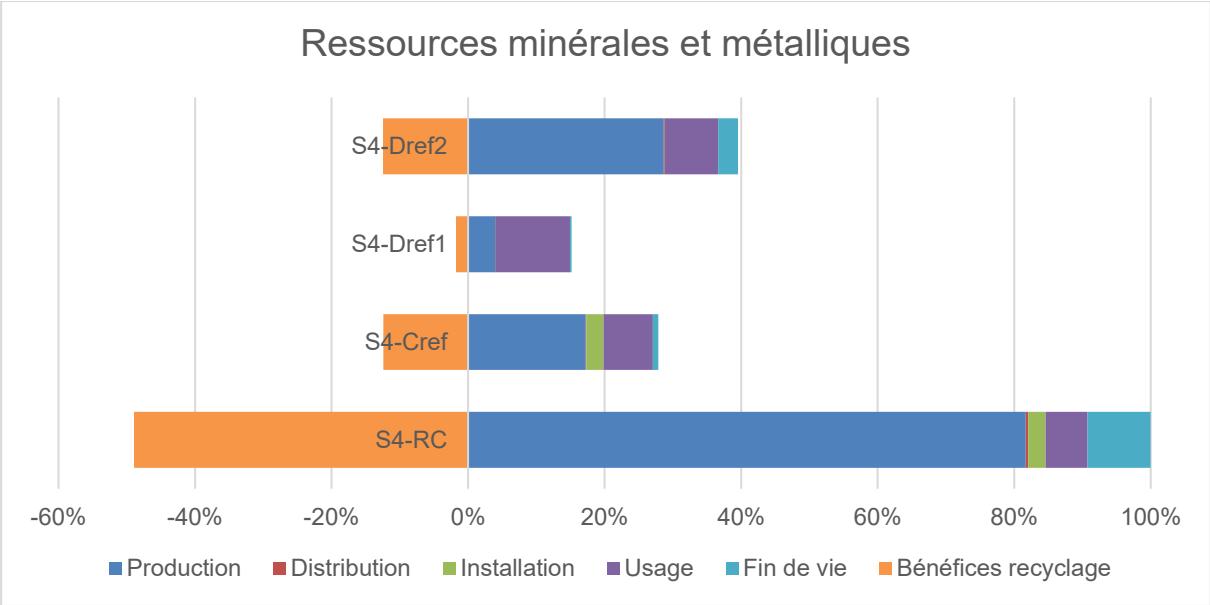


Figure 5-35 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les solutions à base de chaudières gaz demandent la quantité la plus faible de métaux, et ont donc un impact plus faible ;
- Pour les solutions solaires décentralisées, il faut tout de même investir dans des panneaux et une chaudière, ce qui nécessite aussi des matériaux mais la différence avec les scénarios à base de chaudières gaz n'est pas significative au regard des incertitudes ;
- Enfin, la solution solaire centralisée (S4-RC) est la plus impactante malgré les bénéfices du recyclage.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 82 % pour le scénario S4-Dref1 et de 12 à 47 % pour le reste des scénarios ;
- L'étape de production est l'étape majoritaire pour tous les scénarios sauf le scénario S4-Dref1 ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter 50 % de l'impact du scénario S4-RC, 50% dans S4-Créf et 30% pour S4-Dref2;
- L'étape d'installation représente 17% dans le cas du scénario S4-Cref ;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuants à l'impacts des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-25 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Emissions liées à la production des panneaux solaires	19%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	28%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	59%	Emissions liées à la production des panneaux solaires	25%

S4-RC		S4-Cref		S4-Dref1		S4-Dref2	
Emissions liées à la production des différentes pompes réseaux	14%	Emissions liées à l'installation du réseau de chaleur	17%	Emissions liées à la production de la chaudière	25%	Emissions liées à la production de glycol	29%
Emissions liées aux installations de stockage temporaire	16%	Emissions liées à la production des différentes pompes réseaux	15%			Emissions liées à la distribution du gaz en amont	22%
Emissions liées à la consommation d'électricité	10%	Emissions liées à la cheminée (inox)	15%				
Emissions liées à la construction de circuits	13%						

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent dans les différentes étapes du procédé ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz, principalement par la production d'acier et de cuivre utilisés dans les infrastructures ;
- Les impacts de la production de la chaudière pour le scénario S4-Dref1 sont causés par la production de cuivre et de laiton ;
- Les impacts de la production des panneaux solaires sont causés par l'utilisation de cuivre et d'aluminium;
- Les impacts de la production des installations de stockage proviennent de l'acier et de ses alliages dans le cas de l'inox.
- Les impacts de la production des pompes proviennent du laiton dans l'assemblage.

Il convient de nouveau de rappeler l'incertitude liée aux données d'inventaire issue de l'extrapolation du modèle Canadien Drake Landing sur les quantités d'acier dans les stockages intermédiaires ou les circuits. Les conclusions sont en effet à moduler au regard de ces incertitudes.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz, du type de matériaux et de la quantité utilisée. Le scénario S4-RC composé d'une installation solaire centralisée avec stockage temporaire et stockage intersaisonnier est le scénario le plus impactant, causé par une étape de production plus importante.

Les scénarios solaires ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts des systèmes S4-RC et S4-Dref2 viennent des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier, d'aluminium et de cuivre pour le scénario S4-RC doivent être limitées au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.5.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 4

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 4, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 5 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-26 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur les différents indicateurs

Indicateur	Systèmes plus performants que le système étudié	Systèmes moins performants que le système étudié	Principale source de l'impact du système étudié S4-RC
Changement climatique	Aucun	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S4-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S4-Dref1)	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage, dues à l'appoint au gaz naturel.
Toxicité humaine, effets cancérogènes	Chaudières gaz par bâtiment (S4-Dref1)	Aucun	Consommation d'acier dans les éléments de stockage et les circuits primaires post-capteurs thermiques
Particules fines	Tous	Aucun	Consommation d'acier dans les éléments de stockage et les circuits primaires post-capteurs thermiques
Ressources énergétiques	Aucun	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S4-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S4-Dref1)	Consommation d'énergie : gaz ou électricité
Ressources minérales et métalliques	Chaudières gaz par bâtiment (S4-Dref1)	Aucun	Consommation d'acier dans les éléments de stockage et les circuits primaires post-capteurs thermiques, d'aluminium et de cuivre dans les panneaux solaires et consommations électriques

Conclusions tous indicateurs confondus

En considérant uniquement les résultats par indicateur, il est difficile de déterminer quels sont les systèmes qui présentent les meilleures performances environnementales. Les conclusions qu'on peut en tirer dépendent donc fortement de l'importance que le décideur souhaite accorder à chaque indicateur. On peut cependant analyser les résultats obtenus sur les indicateurs endpoint, qui permettent d'évaluer les dommages causés par ces systèmes. Pour permettre de visualiser plus facilement la contribution relative de chaque catégorie d'impact et de comparer les systèmes, les deux graphiques suivants représentent les dommages de chaque système dans leur unité respective. Pour rappel, les modèles endpoint sont très incertains, et il faut des écarts significatifs pour pouvoir établir une hiérarchie. On se gardera donc de donner des conclusions trop tranchées.

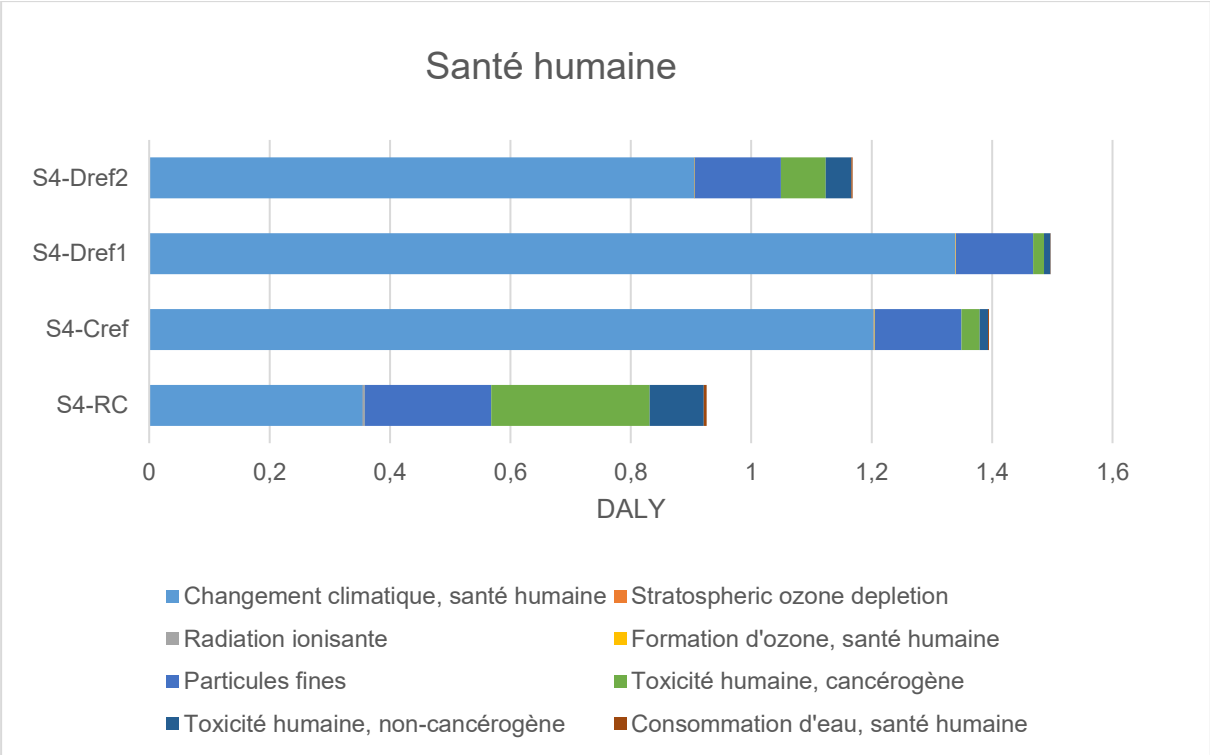


Figure 5-36 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

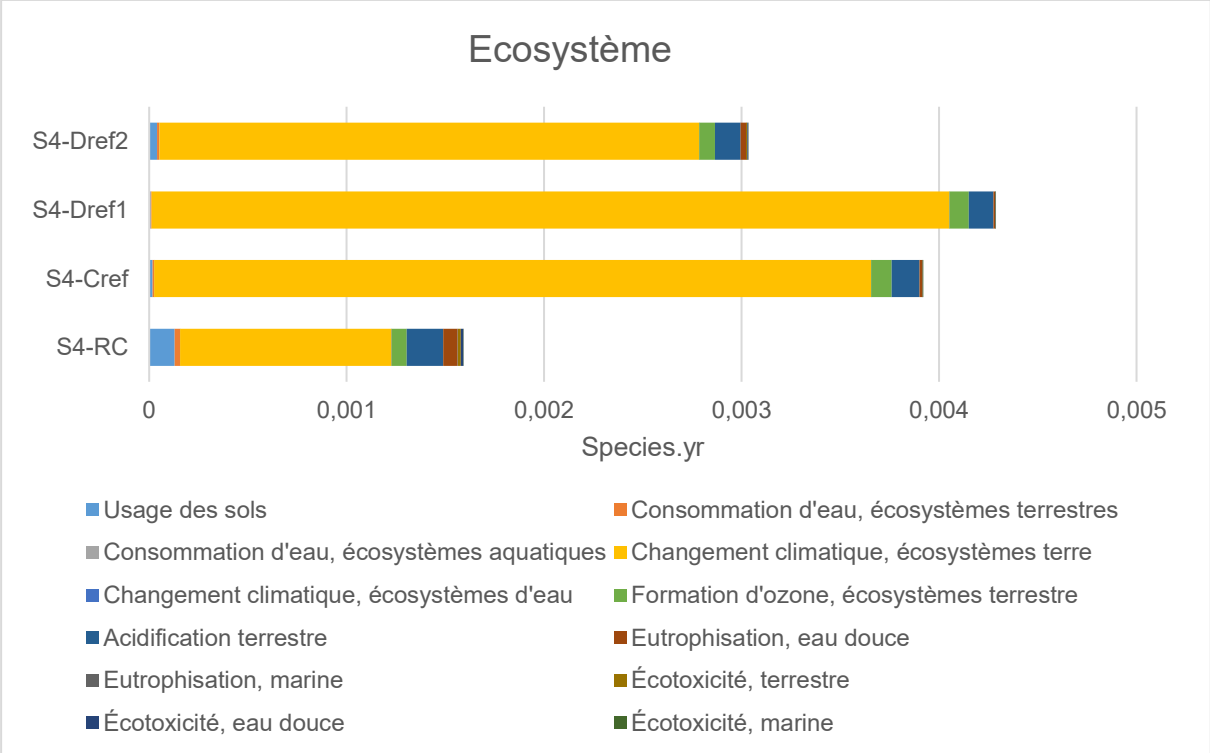


Figure 5-37 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

D'après ces figures, la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes causés par les systèmes comparés dans ce cas d'étude le sont via les impacts sur le changement climatique. Les systèmes solaires (S4-RC et S4-Dref2) sont les plus performants sur cet indicateur, et bien qu'ils soient moins performants sur les indicateurs de toxicité humaine et de particules fines, on peut considérer que ces systèmes causent globalement moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que les systèmes à base de chaudières gaz (S4-Cref et S4-Dref1). Concernant les ressources naturelles,

les systèmes à base de chaudières contribuent davantage à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles (via l'utilisation de gaz naturel), là où les systèmes solaires contribuent en France à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

En ce sens, le système centralisé S4-RC est plus performant que sa variante décentralisée S4-Dref2 car il possède un taux de couverture solaire plus élevé et donc moins de complément en gaz. On observe un net avantage de ce système en ce qui concerne les dommages aux écosystèmes. Cependant, le bénéfice est plus faible en ce qui concerne les dommages à la santé humaine, du fait des impacts plus importants que les autres dans les catégories toxicité humaine et de particules fines.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Au vu de l'importance du complément gaz, une analyse de sensibilité est réalisée sur le taux de couverture solaire du scénario S4-RC. **Une analyse de sensibilité est aussi réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.
La forte contribution des infrastructures sur les scénarios solaires amène également à considérer une analyse de sensibilité sur les taux de recyclage des panneaux.

5.6 Cas d'étude 5

Voici un rappel des configurations des scénarios du cas d'étude 5 :

- S5-R : réseau de froid alimenté par une centrale composée d'un groupe froid à absorption Eau / Bromure de Lithium sur nappe phréatique ;
- S5-Cref : réseau de froid alimenté par une centrale composée d'un groupe froid à compression sur nappe phréatique.

5.6.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 5 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-27 : Cas d'étude 5 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S5-R	S5-Cref
Changement climatique	37%	100%
Destruction de la couche d'ozone	22%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	22%	100%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	51%	100%
Particules fines	44%	100%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	89%	100%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	63%
Acidification terrestre et eau douce	35%	100%
Eutrophisation, eau douce	48%	100%
Eutrophisation, marine	39%	100%
Eutrophisation, terrestre	32%	100%
Ecotoxicité, eau douce	95%	100%
Usage des sols	31%	100%
Consommation d'eau	25%	100%
Ressources énergétiques	23%	100%
Ressources minérales et métalliques	60%	100%

Ce premier tableau nous montre que le scénario S5-R apparait clairement comme le meilleur ou égal au regard des incertitudes sur une majorité d'indicateurs, avec une exception notable sur la toxicité humaine, effets cancérogènes. Afin de comprendre ces résultats, de premières analyses permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, les analyses de contribution permettent ensuite de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.6.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 5 sur chacun des impacts endpoint considérés.

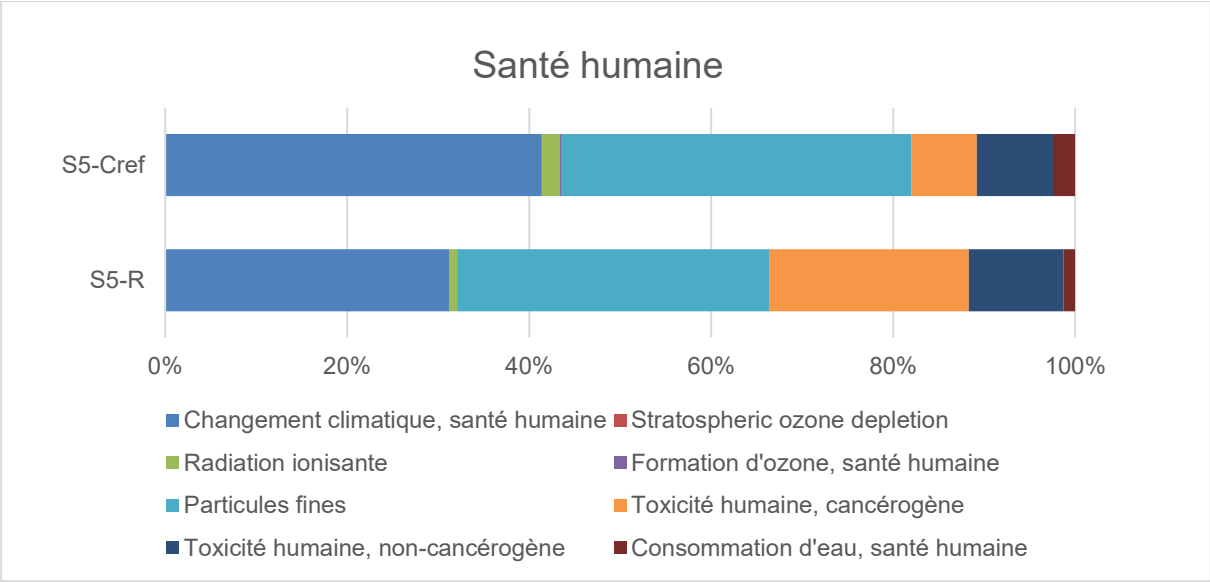


Figure 5-38 : Cas d'étude 5 : Impact endpoint sur la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent principalement des impacts du changement climatique et des particules puis dans un second ordre les 2 impacts de toxicité humaine.

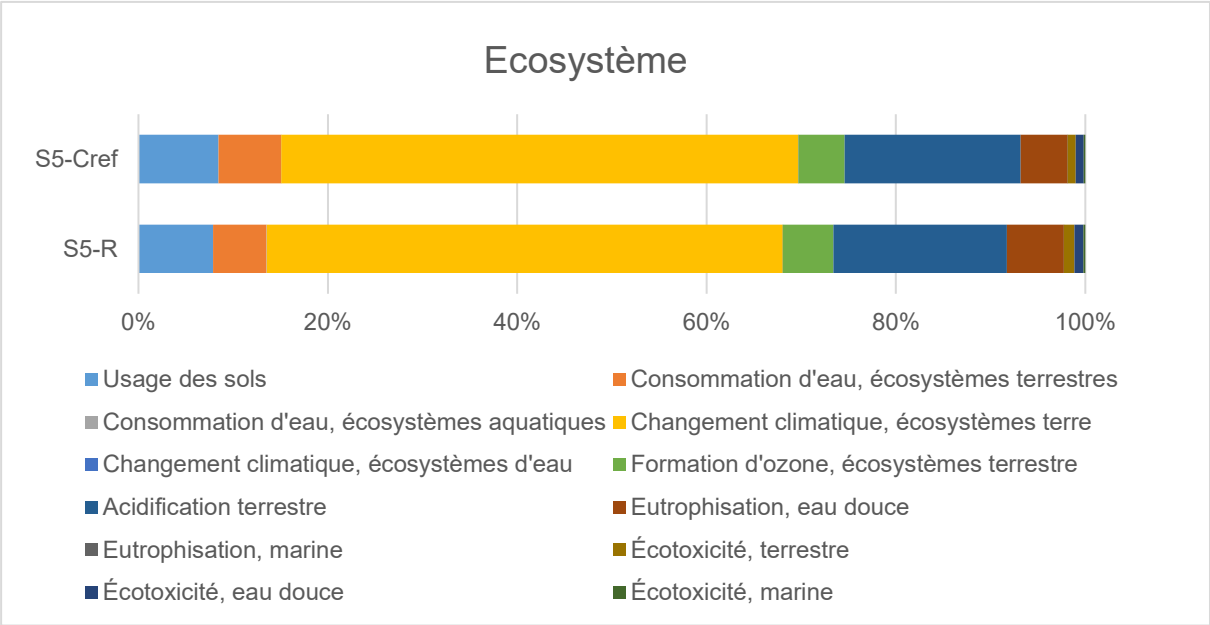


Figure 5-39 : Cas d'étude 5 : Impact endpoint sur les écosystèmes

Les dommages causés aux écosystèmes par les scénarios proviennent principalement des impacts du changement climatique et de l'acidification terrestre et eau douce.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 5 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Acidification terrestre et eau douce
- Particules fines ;
- Toxicité humaine cancérogène
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.6.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.6.3.1 Changement Climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur de changement climatique.

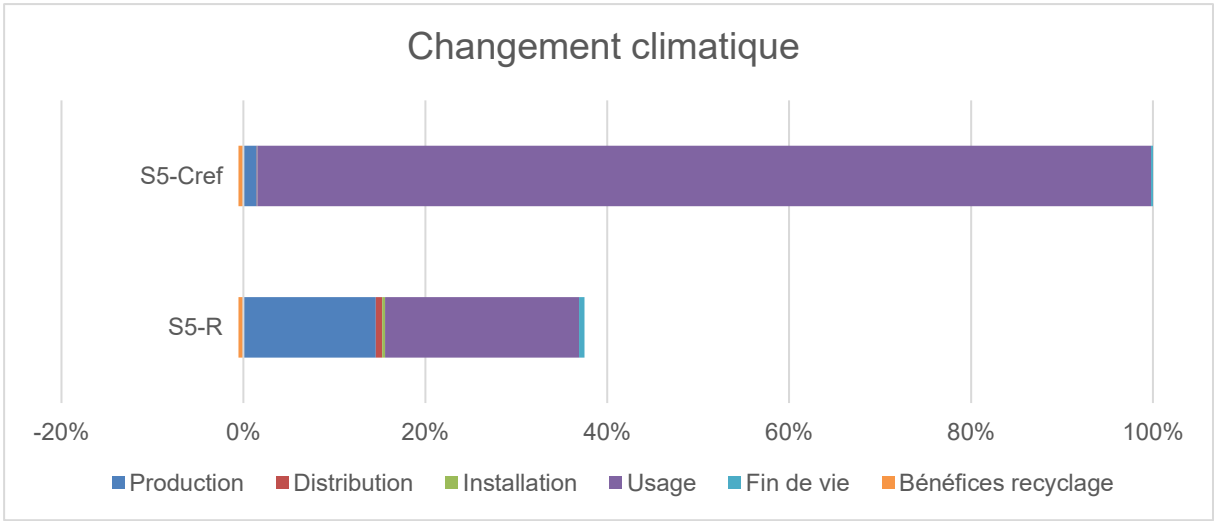


Figure 5-40 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts du changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S5-R, basé sur un groupe froid à absorption eau/LiBr, a un impact plus de deux fois moindre en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des groupes froid à compression;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts du changement climatique à cause de la consommation d'électrique comme montré dans le tableau suivant :
- La phase de production représente cependant presque 30% du scénario S5-R alors qu'elle est presque négligeable sur le scénario à base de compresseurs électriques

Tableau 5-28 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S5 R		S5 Cref	
Consommation électrique des pompes du réseau	55%	Consommation électrique des éléments thermodynamiques	78%
Emissions liées à l'acier des sondes 60m	37%	Consommation électrique des pompes du réseau	21%

Dans les 2 scénarios, les impacts sur le changement climatique proviennent de la consommation électrique. Dans S5-R, ils proviennent de la consommation électrique des pompes du réseau (531 MWh). Pour S5-Créf, la consommation des pompes du réseau est identique mais reste relativement faible au regard de la consommation du compresseur électrique (2 GWh). Dans le mix électrique ce sont les filières gaz naturel et charbon qui sont les principaux responsables des impacts de l'indicateur.

Dans le scénario S5-R, 37% des impacts sont liés à l'acier des sondes de 60m, principalement des étapes de production et de fabrication et notamment à cause de l'impact du mix chinois lors des étapes d'extraction des minerais de fer.

5.6.3.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce.

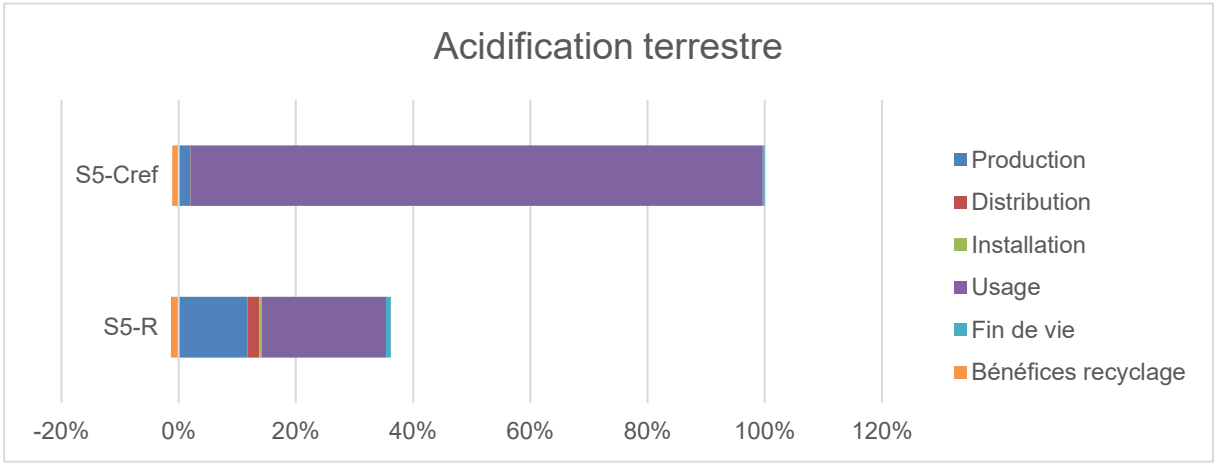


Figure 5-41 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S5-R, basé sur un groupe froid à absorption eau/LiBr, a un impact moitié moindre en comparaison avec la solution conventionnelle S5-Cref basée sur des groupes froid à compression.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts de l'acidification à cause de la consommation d'électrique comme montré dans le tableau suivant ;
- La phase de production représente cependant presque 30% du scénario S5-R alors qu'elle est presque négligeable sur le scénario à base de compresseurs électriques.

Tableau 5-29 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

S5 R		S5 Cref	
Consommation électrique des pompes du réseau	58%	Consommation des éléments thermodynamiques	78%
Sondes (dont acier 14%)	33%	Consommation électrique des pompes du réseau	20%

Dans les 2 scénarios, la consommation électrique est à l'origine de la majorité des impacts notamment à cause des filières de charbon et de cogénération du biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat).

Dans le scénario S5-R, les impacts de l'acidification terrestre et eau douce proviennent également de la production de l'acier qui constitue les sondes dus à l'utilisation de coke dans le procédé.

5.6.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur particules fines.

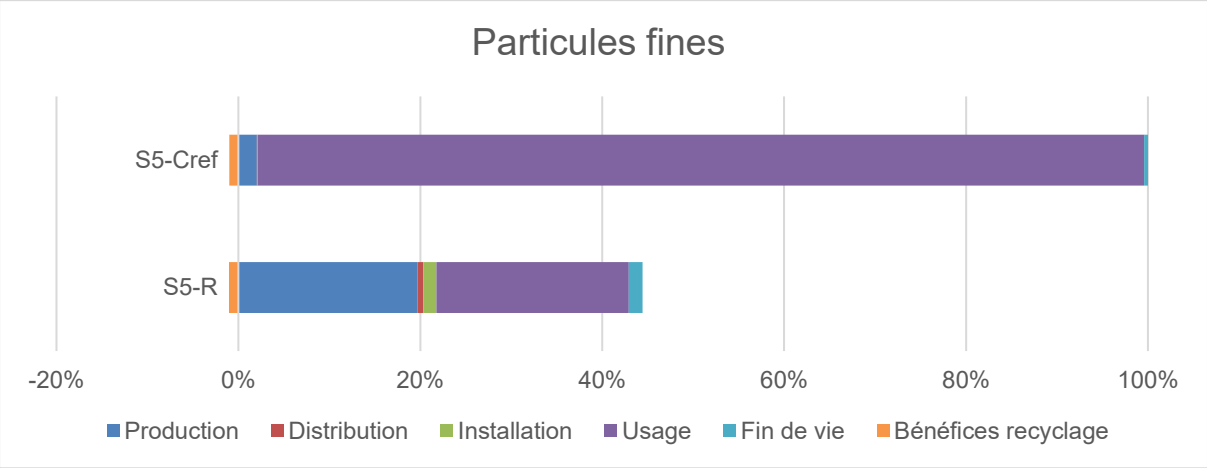


Figure 5-42 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S5-R, basé sur un groupe froid à absorption eau/LiBr, a un impact moitié moindre en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des groupes froid à compression ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts des particules fines à cause de la consommation d'électrique comme montré dans le tableau suivant :
- La phase de production représente cependant presque 50% du scénario S5-R alors qu'elle est presque négligeable sur le scénario à base de compresseurs électriques

Tableau 5-30 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines

S5 R		S5 Cref	
Consommation électrique des pompes du réseau	47%	Consommation électrique des éléments thermodynamiques	78%
Emissions liées à l'acier des sondes 60m	43%	Consommation électrique des pompes du réseau	20%

Dans les 2 scénarios, la consommation électrique contribue à la majorité des impacts notamment la filière nucléaire à cause de l'extraction d'uranium.

Les impacts dans les 2 scénarios proviennent également de l'extraction de l'acier utilisé dans les sondes.

5.6.3.4 Toxicité humaine, effets cancérogènes

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes.

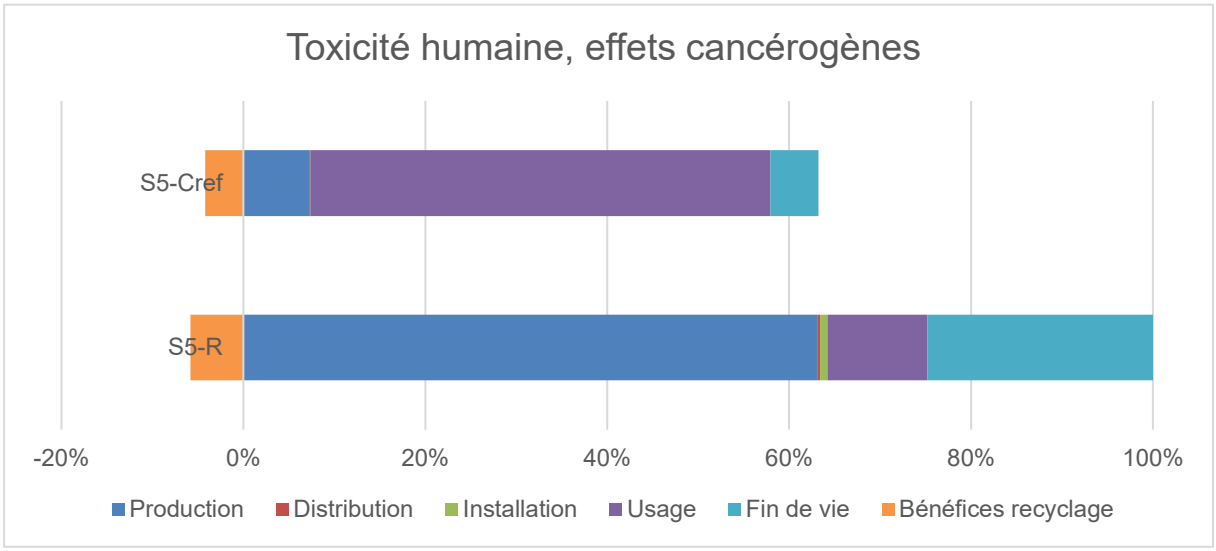


Figure 5-43 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de toxicité humaine, effets cancérogènes

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Contrairement aux autres indicateurs, le système renouvelable S5-R basé sur un groupe froid à absorption est moins performant que la solution conventionnelle basée sur des groupes froid à compression ;
- Cette comparaison est cependant à mettre en regard des incertitudes liées à la méthodologie de caractérisation de la toxicité humaine : l'écart, de l'ordre de 30 %, est trop faible pour pouvoir conclure à un avantage net au système S5-C.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts due toxicité humaine à cause de la consommation d'électrique pour le scénario à base de compresseurs électriques S5-Cref
- La phase de production est la plus contributrice pour le scénario S5-R à cause de l'extraction de l'acier pour la production des sondes. Il convient de rappeler que ces quantités d'acier ont été estimées à partir de documentations techniques et ne sont pas représentatrices d'une large gamme de produits.

Tableau 5-31 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes

S5 R		S5 Cref	
Emissions liées à l'acier des sondes 60m	75%	Consommation électrique des éléments thermodynamiques	68%
Consommation électrique des pompes du réseau	11%	Consommation électrique des pompes du réseau	16%

Pour le scénario S5-R, l'impact est majoritairement lié à la production d'acier nécessaire aux sondes.

Dans les 2 scénarios, la consommation électrique contribue fortement aux impacts de toxicité humaine cancérogènes, notamment la filière nucléaire mais également la production d'aluminium et de cuivre nécessaires pour les réseaux de transmissions électriques. C'est cependant la phase de production qui fait la différence entre le scénario S5-R et sa variante conventionnelle S5-Cref. L'extraction de l'acier est responsable de la majorité de l'impact. Il convient de rappeler que la méthode de caractérisation est incertaine et que les hypothèses de quantité d'acier le sont également. On ne peut conclure à une hiérarchie stricte entre ces scénarios.

5.6.3.5 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

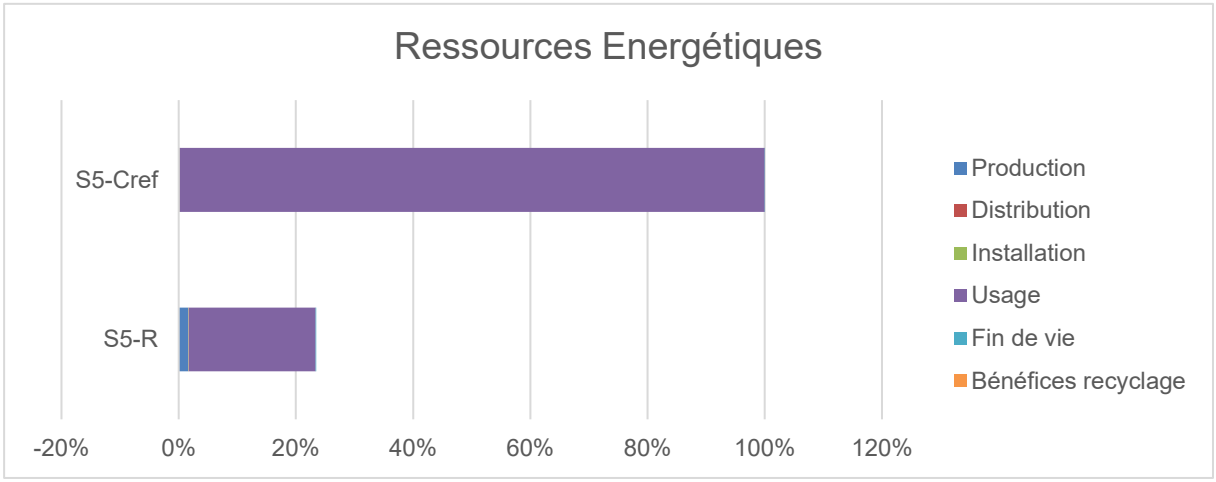


Figure 5-44 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S5-R, basé sur un groupe froid à absorption eau/LiBr, a un impact deux tiers moindre en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des groupes froid à compression

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts d'épuisement des ressources fossiles à cause de la consommation électrique comme montré dans le tableau suivant :

Tableau 5-32 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de ressources énergétiques

S5 R	S5 Cref

Consommation électrique des pompes du réseau	88%	Consommation des éléments thermodynamiques	79%
		Consommation électrique des pompes du réseau	21%

Dans les 2 scénarios, la consommation électrique contribue à la majorité des impacts notamment la filière nucléaire à cause de l'utilisation d'uranium enrichi dans les centrales.

5.6.3.6 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 5 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques.

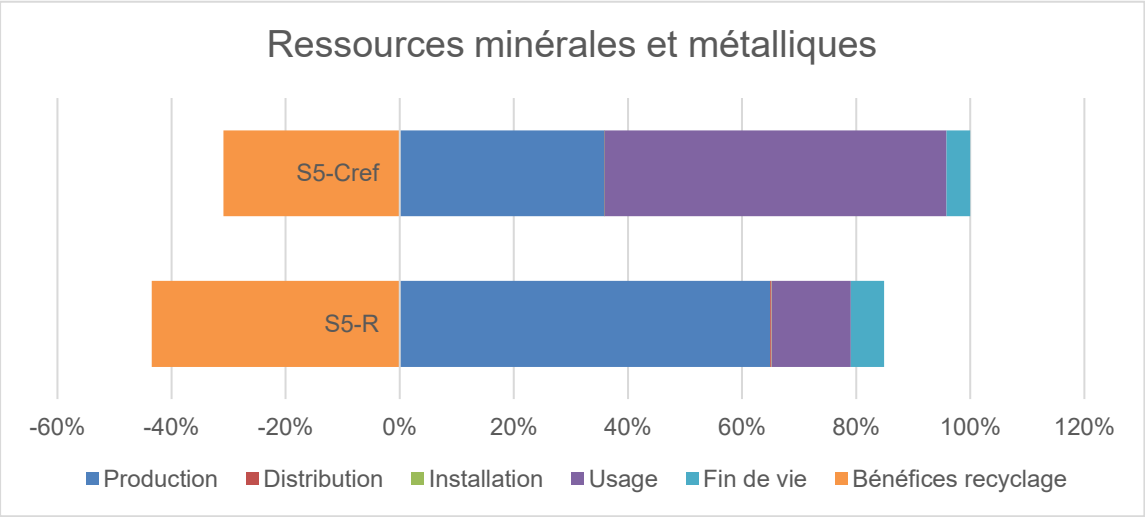


Figure 5-45 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S5-R, basé sur un groupe froid à absorption eau/LiBr, a un impact moindre en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des compresseurs électriques ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts d'épuisement des ressources fossiles à cause de la consommation électrique dans le cas du scénario S5-Cref :
- La phase de production représente cependant presque 60% du scénario S5-R à cause notamment de la production des sondes

Tableau 5-33 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques

S5 R		S5 Cref	
Sondes (dont acier 23%)	36%	Consommation électrique des éléments thermodynamiques	68%
Consommation électrique des pompes du réseau	29%		
Production de la PAC (cuivre du moteur)	22%	Consommation électrique des pompes du réseau	18%

Dans la 2 scénarios, la consommation électrique est très contributrice aux impacts à cause du cuivre et du plomb utilisé dans les transmissions du réseau électrique.

Les autres sources d'impacts proviennent de la production des équipements : utilisation de cuivre dans le moteur des PAC et utilisation de l'acier dans les sondes.

5.6.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 5

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 5, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 6 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	Système le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S5-R
Changement climatique	S5-R	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage dues à la consommation électrique
Acidification terrestre et eau douce	S5-R	Consommation électrique des pompes du réseau et éléments thermodynamiques
Particules fines	S5-R	Consommation électrique des pompes du réseau et éléments thermodynamiques
Toxicité humaine, effets cancérogènes	S5-Cref (avantage faible au regard de l'incertitude de l'indicateur)	Acier des sondes
Ressources énergétiques	S5-R	Consommation électrique des pompes du réseau et éléments thermodynamiques
Ressources minérales et métalliques	S5-R	Consommation électrique des pompes du réseau et éléments thermodynamiques

Conclusions tous indicateurs confondus

Le système S5-R est plus performant que le système S5-Cref dans toutes les catégories d'impact étudiées sauf pour l'indicateur de toxicité humaine. On peut donc conclure que le système S5-R cause moins de dommages aux écosystèmes que le système S5-Cref. En ce qui concerne les dommages à la santé humaine, une comparaison des résultats obtenus avec les indicateurs endpoint est présentée dans la figure suivante :

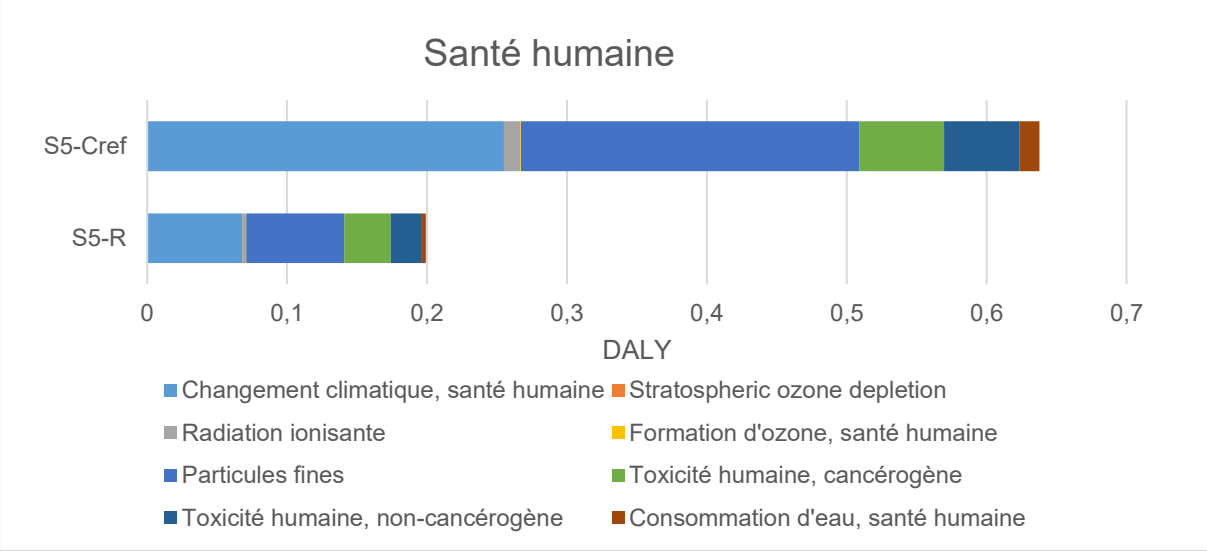


Figure 5-46 : Cas d'étude 5 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

On note que les dommages à la santé humaine causés par le système S5-R sont environ égaux à 30 % de ceux du système S5-Cref. On peut remarquer également que les dommages causés via la toxicité humaine (effets cancérogènes) sont plus faibles pour le S5-R (0,03 DALY) que pour le S5-Cref (0,06 DALY) alors que c'est l'inverse pour les résultats obtenus au niveau midpoint (cf. § 5.6.3.4). C'est dû au fait que les modèles de caractérisation ne sont pas cohérents entre les méthodes utilisées au niveau midpoint (méthode EF 2.0 reposant sur le modèle USEtox) et au niveau endpoint (ReCiPe 2016).

On peut donc conclure que le système à base de groupe à absorption sur source de chaleur fatale (S5-R) est celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, au vu de sa bien moindre consommation d'électricité en comparaison avec le système fonctionnant avec un compresseur électrique (S5-Cref). Concernant les ressources naturelles, la conclusion est la même au vu de l'électricité consommée en plus grande quantité sur le système à compression (S5-Cref) qui contribue en France à l'épuisement des ressources en uranium et plus généralement à l'épuisement des ressources minérales et métalliques. En ce qui concerne l'indicateur de toxicité humaine, le système S5-Cref à base de groupe froid à compression a des impacts plus faibles que le système à base de groupe froid à absorption Eau/LiBr, principalement à cause de la quantité supérieure d'acier à produire pour construire les sondes. Cet écart d'impact est cependant faible au regard des grandes incertitudes liées à cet indicateur.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, **une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « industrie » peu carboné et un mix par usage « chauffage » pour la sensibilité d'un mix très fossile et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

Le groupe à absorption du S5-R fonctionne avec de l'énergie fatale extérieure, considérée ici comme gratuite au vu du coefficient B pris à 1. Il serait intéressant d'analyser l'évolution des conclusions avec une variation de ce coefficient B, notamment selon les préconisations de PEF (à 0), ce qui revient à évaluer les impacts du groupe à absorption si la chaleur qui l'alimente n'est pas de la chaleur fatale.
Enfin, le groupe à compression du S5-Cref fonctionne avec un réfrigérant à faible PRG peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).

5.7 Cas d'étude 6

Voici un rappel des configurations des scénarios de l'étude de cas 6 :

- Système S6-R : Pompe à chaleur fonctionnant à l'ammoniac sur nappe phréatique ;
- Système S6-Cref : Chaudière gaz à condensation.

5.7.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 6 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-34 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S6-R	S6-Cref
Changement climatique	6%	100%
Destruction de la couche d'ozone	18%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	6%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	21%	100%
Particules fines	100%	83%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	66%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	81%
Acidification terrestre et eau douce	62%	100%
Eutrophisation, eau douce	100%	30%
Eutrophisation, marine	39%	100%
Eutrophisation, terrestre	60%	100%
Ecotoxicité, eau douce	100%	65%
Usage des sols	100%	19%
Consommation d'eau	100%	14%
Ressources énergétiques	45%	100%
Ressources minérales et métalliques	100%	38%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire. Le classement entre le scénario de référence et le scénario conventionnel dépend fortement de l'indicateur considéré. Le scénario S6-R est moins impactant notamment sur le changement climatique, mais il l'est plus sur les indicateurs de toxicité humaine par exemple.

Il est à ce stade difficile de départager les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.7.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 6 sur chacun des impacts endpoint considérés.

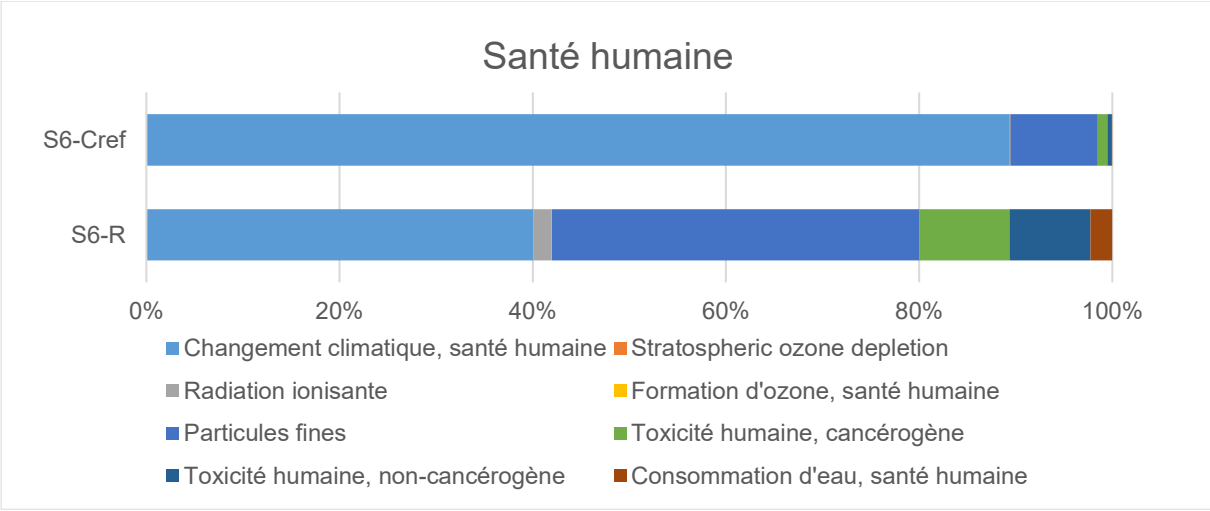


Figure 5-47 : Cas d'étude 6 : Impact endpoint sur la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent principalement des impacts du changement climatique et des particules fines.

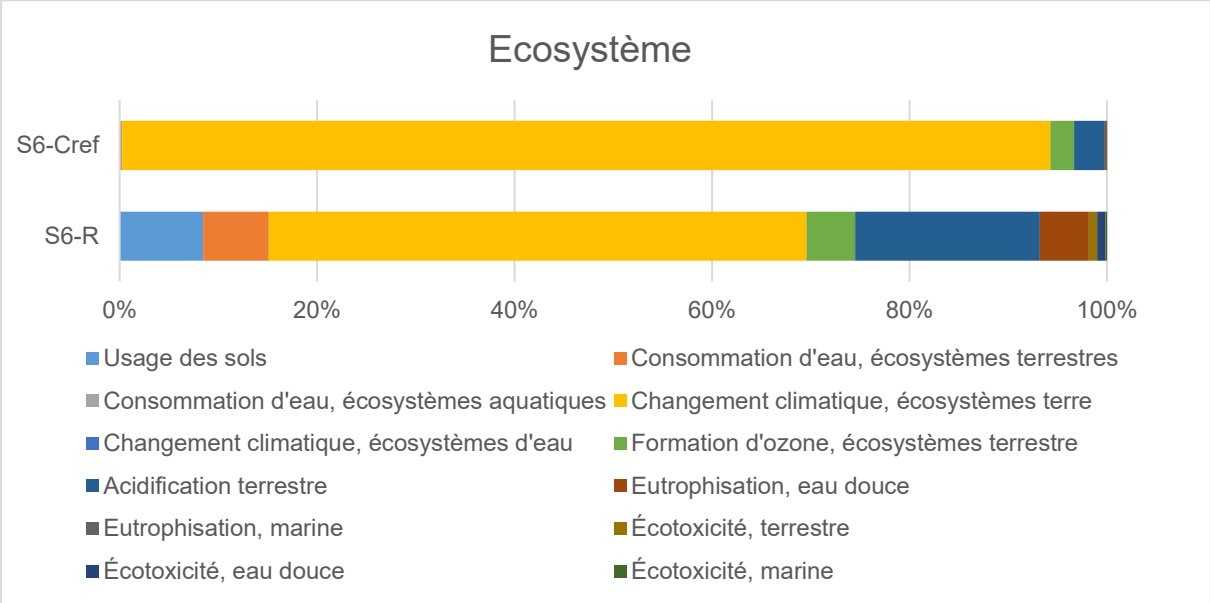


Figure 5-48 : Cas d'étude 6 : Impact endpoint sur les écosystèmes

Les dommages causés aux écosystèmes par les scénarios proviennent principalement des impacts du changement climatique et de l'acidification terrestre et eau douce.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 6 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Acidification terrestre et eau douce
- Particules fines ;
- Epuisement des énergies fossiles ;

- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.7.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.7.3.1 Changement Climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 6 sur l'indicateur de changement climatique.

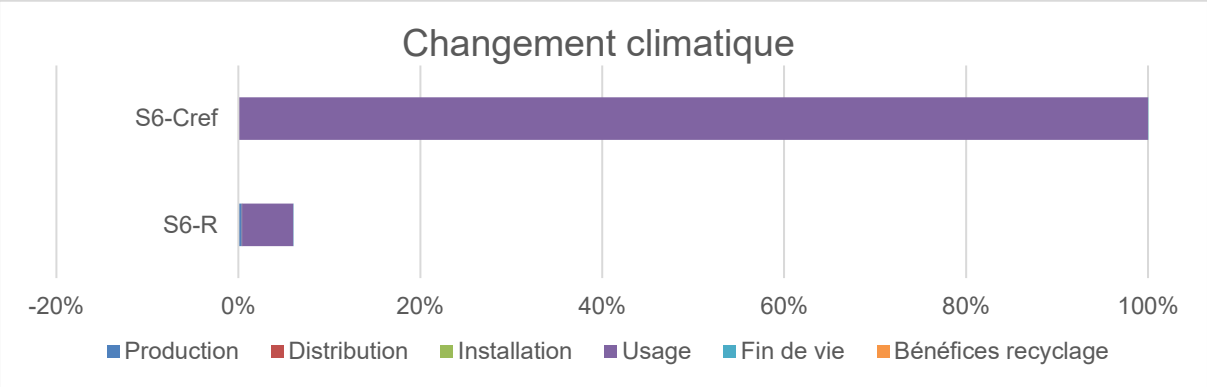


Figure 5-49 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts du changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S6-R, à base de PAC ammoniac, a un impact de près de dix fois moins important en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts du changement climatique à cause de la consommation énergétique (électricité ou gaz naturel selon le scénario) comme montré dans le tableau suivant :

S6 R		S6 Cref	
Consommation électrique de la PAC	88%	Emissions du gaz naturel	84%
		Consommation de gaz	16%

Le reste des étapes du cycle de vie sont négligeables par rapport à la phase d'usage pour l'indicateur de réchauffement climatique.

5.7.3.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 6 sur l'indicateur d'acidification terrestre et d'eau douce.

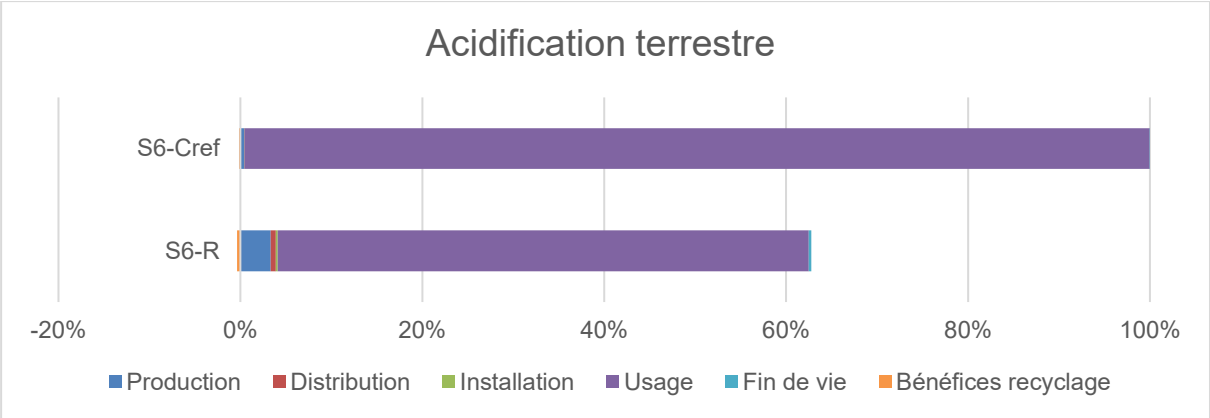


Figure 5-50 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'acidification terrestre et d'eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution renouvelable S6-R a un impact moindre en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts d'acidification terrestre et d'eau douce à cause de la consommation énergétique (électricité ou gaz naturel selon le scénario) comme montré dans le tableau suivant :

Tableau 5-35 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts d'acidification terrestre et d'eau douce

S6 R		S6 Cref	
Consommation électrique de la PAC	88%	Consommation de gaz	77%
		Emissions directes liées à la combustion du gaz	20%

Le reste des étapes du cycle de vie sont négligeables par rapport à la phase d'usage pour l'indicateur d'acidification terrestre et d'eau douce.

5.7.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 6 sur l'indicateur de particules fines.

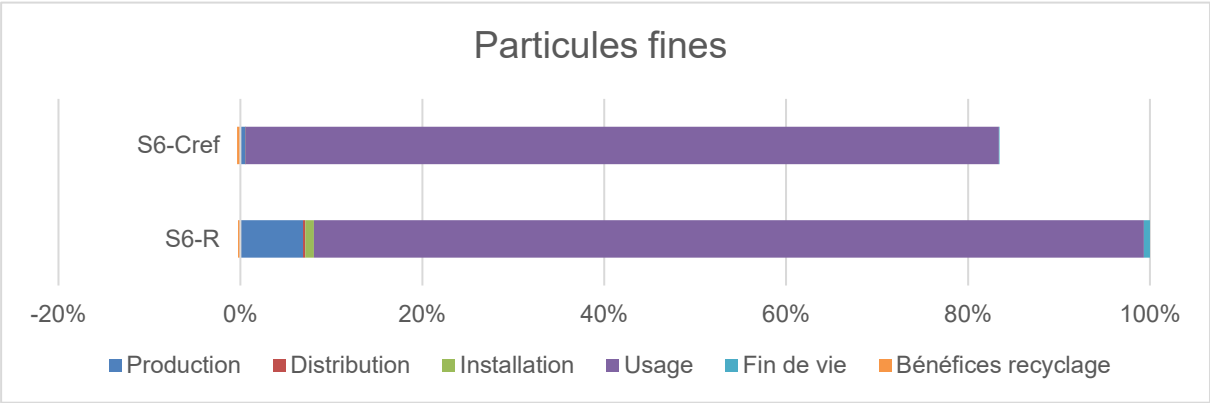


Figure 5-51 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Contrairement aux autres indicateurs, le système renouvelable S6-R est plus impactant que la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz ;
- Cette différence est faible au regard des incertitudes de la méthode de caractérisation ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts des particules fines à cause de la consommation énergétique (électricité ou gaz naturel selon le scénario) comme montré dans le tableau suivant ;

Tableau 5-36 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de particules fines

S6 R		S6 Cref	
Consommation électrique de la PAC	85%	Consommation de gaz	60%
		Emissions directes de la combustion	39%

Le reste des étapes du cycle de vie sont négligeables par rapport à la phase d'usage pour l'indicateur de particules fines.

5.7.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 6 sur l'indicateur de ressources énergétiques.

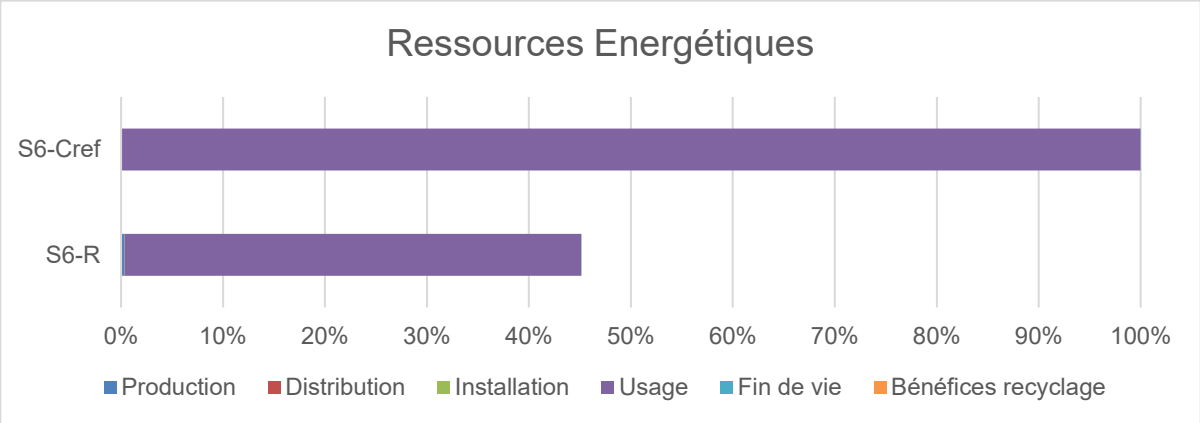


Figure 5-52 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable S6-R a un impact moitié important en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts des ressources énergétiques à cause de la consommation énergétique (électricité ou gaz naturel selon le scénario) comme montré dans le tableau suivant :

Tableau 5-37 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques

S6 R		S6 Cref	
Consommation électrique de la PAC	93%	Consommation de gaz basse pression	98%

Le reste des étapes du cycle de vie sont négligeables par rapport à la phase d'usage pour l'indicateur des ressources énergétiques.

5.7.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 6 sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques.

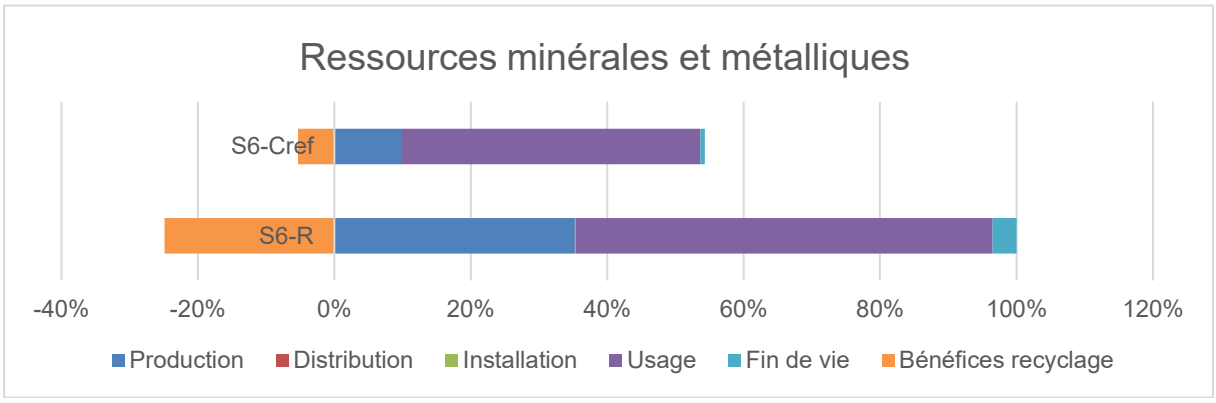


Figure 5-53 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le système renouvelable à base de PAC ammoniac a cette fois un impact largement plus important en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz ;
- La raison principale est le recours à l'électricité et les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent dans les différentes étapes du procédé.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- La phase d'usage est l'étape la plus contributrice sur les impacts des ressources minérales et métalliques à cause de la consommation énergétique (électricité ou gaz naturel selon le scénario) pour les deux scénarios ;
- La phase de production représente cependant presque 40% de l'impact du S6-R, à cause des sondes et des équipements thermodynamiques ;
- Le recyclage permet d'éviter 25% d'impact du S6-R.

Tableau 5-38 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de ressources minérales et métalliques

S6 R		S6 Cref	
Consommation électrique de la PAC	74%	Consommation de gaz	78%
Sondes (acier)	7%		
Equipement thermodynamique (cuivre)	7%	Consommation des pompes	7%

Le scénario S6-R est également marqué par l'extraction de l'acier nécessaire à la production des sondes (à hauteur de 7%) et de celle du cuivre dans le moteur de l'équipement thermodynamique (à hauteur de 6%).

5.7.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 6

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 6, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 5 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux

écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-39 : Synthèse des contributions dans le cas d'étude 6

Indicateur	Système le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S6-R
Changement climatique	S6-R	Emissions lors de la phase d'usage dues à la consommation énergétique
Acidification terrestre et eau douce	S6-R	Consommation énergétique lors de la phase d'usage
Particules fines	S6-Créf	Consommation électrique de la PAC
Ressources énergétiques	S6-R	Consommation énergétique lors de la phase d'usage
Ressources minérales et métalliques	S6-Créf	Consommation énergétique lors de la phase d'usage

Conclusions tout indicateurs confondus

Pour le changement climatique, comme pour l'épuisement des ressources énergétiques et de l'acidification, le scénario S6-R à base de pompe à chaleur ammoniaque est plus performant que le scénario conventionnel. On peut donc conclure que c'est le système qui cause le moins de dommage aux écosystèmes. En ce qui concerne la santé humaine, la Figure 5-54 ci-dessous montre que la différence entre la différence de dommages causés par les impacts sur les particules fines est loin de compenser la meilleure performance du scénario S6-R sur le changement climatique. C'est donc également celui-là qui cause le moins de dommages à la santé humaine.

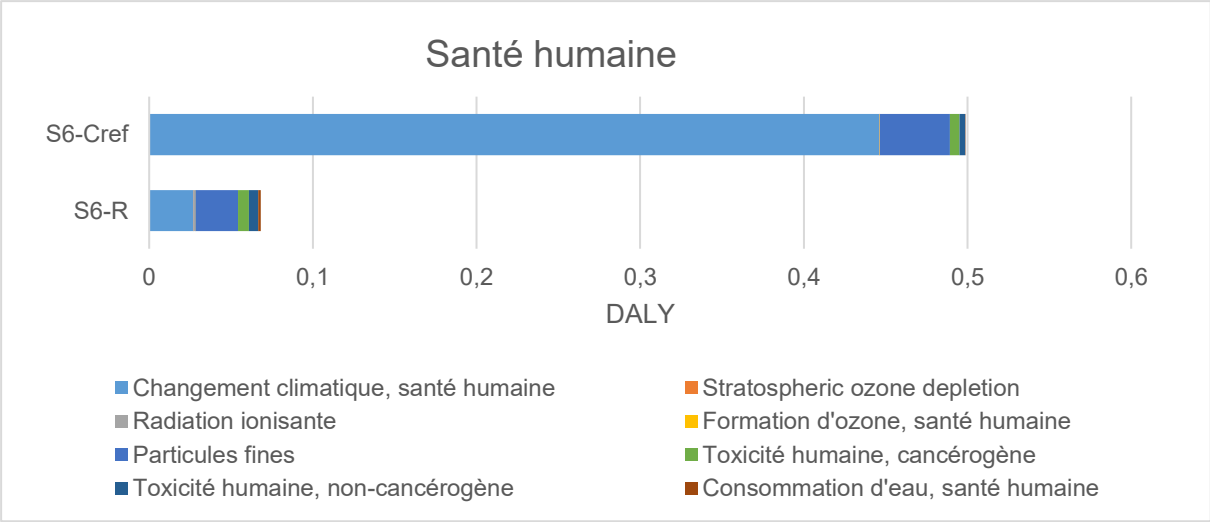


Figure 5-54 : Cas d'étude 6 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

Pour les deux systèmes étudiés dans cette étude de cas 6, les impacts proviennent presque exclusivement de la consommation énergétique lors de la phase d'usage. Dans un cas, les impacts viennent de la consommation électrique de la pompe à chaleur (S6-R) et dans l'autre cas ils sont dus à la consommation de gaz naturel pour la chaudière.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, **une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « industrie » peu carboné et un mix par usage « chauffage » pour la sensibilité d'un mix très fossile et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

Enfin, la pompe à chaleur fonctionne avec un réfrigérant à faible PRG peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).

5.8 Cas d'étude 7

Voici un rappel des configurations des scénarios de l'étude de cas 7 :

- Système S7-R : Pompe à chaleur hybride (cycle absorption ammoniac/eau et cycle compression à l'ammoniac) utilisant de la chaleur fatale ;
- Système S7-Cref : Chaudière gaz de 1.7 MW.

5.8.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-40 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S7-R	S7-Cref
Changement climatique	9%	100%
Destruction de la couche d'ozone	26%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	3%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	26%	100%
Particules fines	100%	60%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	57%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	86%
Acidification terrestre et eau douce	89%	100%
Eutrophisation, eau douce	100%	22%
Eutrophisation, marine	53%	100%
Eutrophisation, terrestre	88%	100%
Ecotoxicité, eau douce	100%	57%
Usage des sols	100%	12%
Consommation d'eau	100%	9%
Ressources énergétiques	64%	100%
Ressources minérales et métalliques	100%	28%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire. Le classement entre le scénario de référence et le scénario conventionnel dépend fortement de l'indicateur considéré. Le scénario S7-R est moins impactant notamment sur le changement climatique, mais il l'est plus sur les indicateurs de toxicité humaine par exemple.

Il est à ce stade difficile de départager les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.8.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts endpoint considérés.

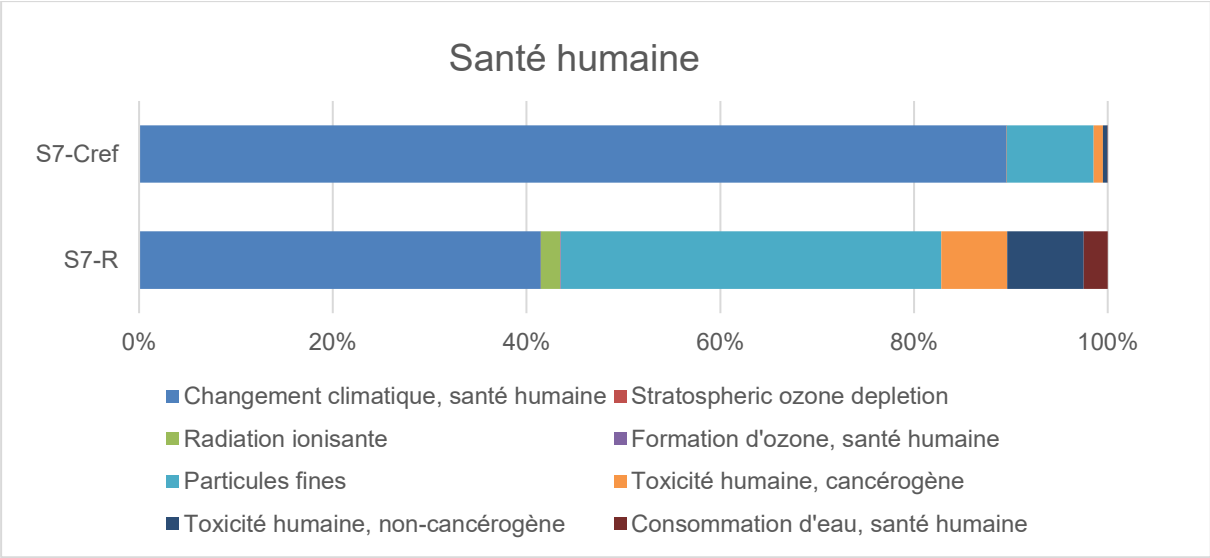


Figure 5-55 : Cas d'étude 7 : Impact endpoint sur la santé humaine

Les dommages sur la santé humaine proviennent des indicateurs changement climatique et particules fines.

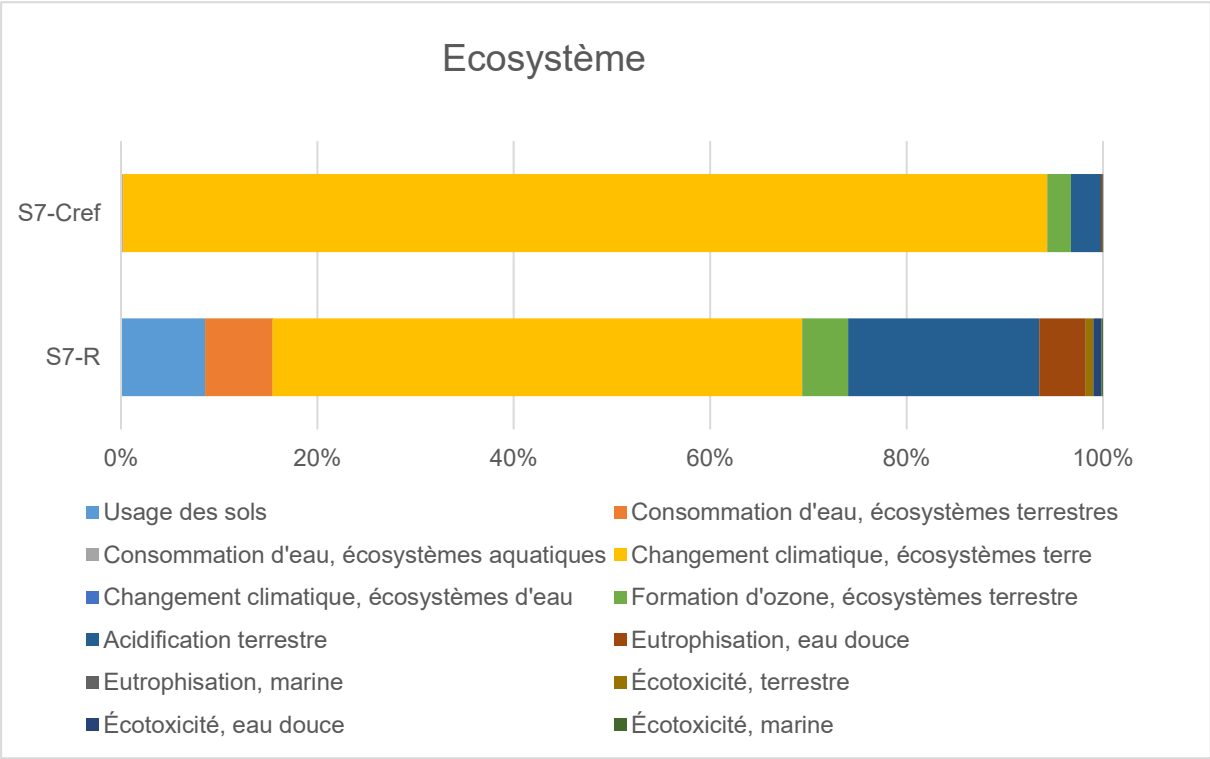


Figure 5-56 : Cas d'étude 7 : Impact endpoint sur les écosystèmes

Les dommages causés aux écosystèmes par les scénarios proviennent principalement des impacts du changement climatique et de l'acidification terrestre et eau douce.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 5 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Acidification terrestre et eau douce ;
- Particules fines ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.8.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.8.3.1 Changement climatique

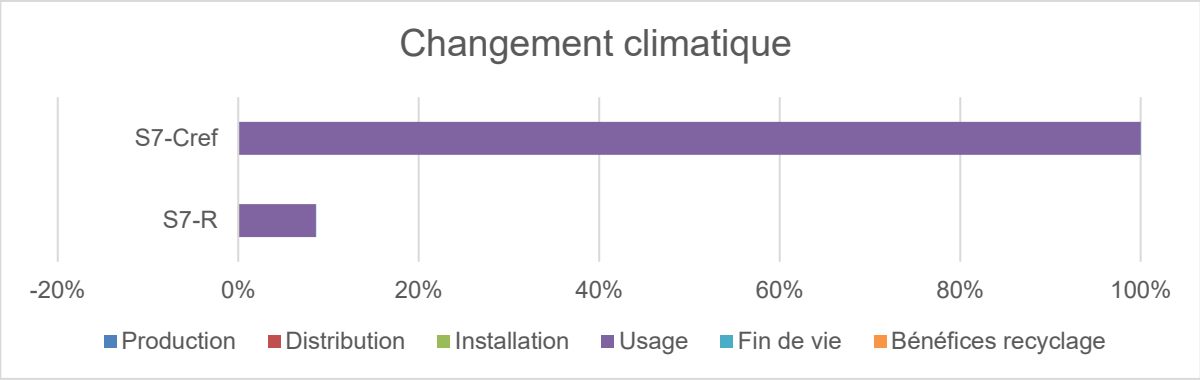


Figure 5-57 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario étudié (S7-R) est environ dix fois plus performant que le scénario industriel conventionnel ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de la quasi-totalité des impacts : que ce soit l'électricité des pompes dans S7-R ou le gaz dans S7-Créf

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet d'identifier les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-41 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de changement climatique

S7 R	S7 Cref	
Consommation électrique de la PAC 99%	Emissions directes de la combustion	84%
	Consommation de gaz	16%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité de gaz consommée comparée à la consommation en plus faible quantité d'électricité. Le scénario S7-Cref composé d'une chaudière gaz est le scénario le plus émetteur de CO_2 eq., causé par la combustion du gaz.

5.8.3.2 Acidification terrestre et eau douce

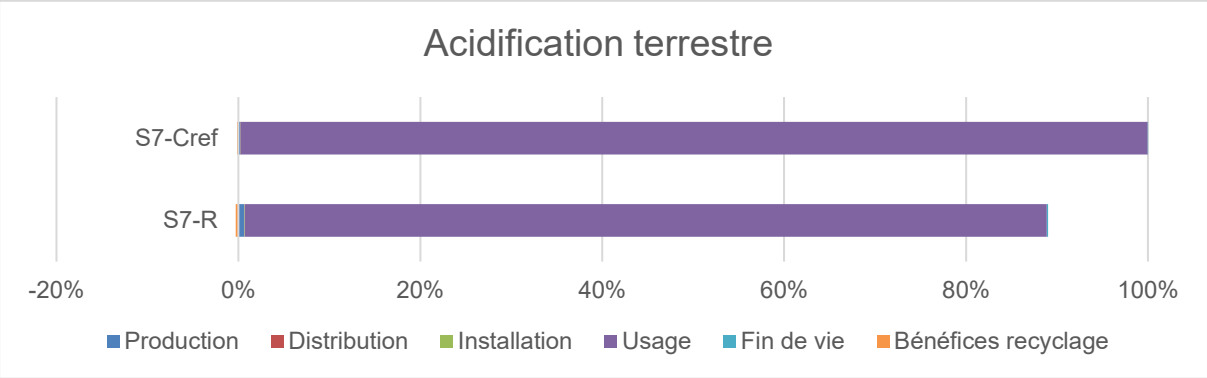


Figure 5-58 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'instar du changement climatique, la solution S7-R a un impact plus faible que la solution conventionnelle de référence S7-Cref.
- La raison principale est une demande plus importante d'énergie sous forme gaz que l'on retrouve sur l'étape d'usage pour le S7-Cref sous forme d'électricité en complément de la source fatale pour le scénario S7-R.
- Cependant, l'écart entre les deux solutions est uniquement de l'ordre de 10 %, ce qui est faible au regard des incertitudes liées au modèle utilisé pour cet indicateur (classé niveau II selon le guide PEF).

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de plus de 95 % des impacts pour chaque scénario
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de relever les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-42 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce

S7 R		S7 Cref	
Consommation électrique de la PAC	95%	Emissions directes de la combustion	80%
		Consommation de gaz	20%

L'analyse de ces différents procédés ont permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par les émissions d'ammoniac lors de la production du biogaz utilisé dans la production électrique par cogénération (hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission de particules fines lors de la combustion ;

Conclusion sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

Les impacts proviennent, pour les 2 scénarios, de la phase d'usage et plus particulièrement de la consommation énergétique. Dans le cas du scénario S7-R, l'utilisation de biogaz dans le mix électrique est la principale cause de pollution tandis que dans le cas de S7-Créf, ce sont les particules fines qui sont responsables des impacts. En prenant en compte les incertitudes liées à cet indicateur, on ne peut pas conclure quant à l'avantage d'un des 2 scénarios.

5.8.3.3 Particules fines

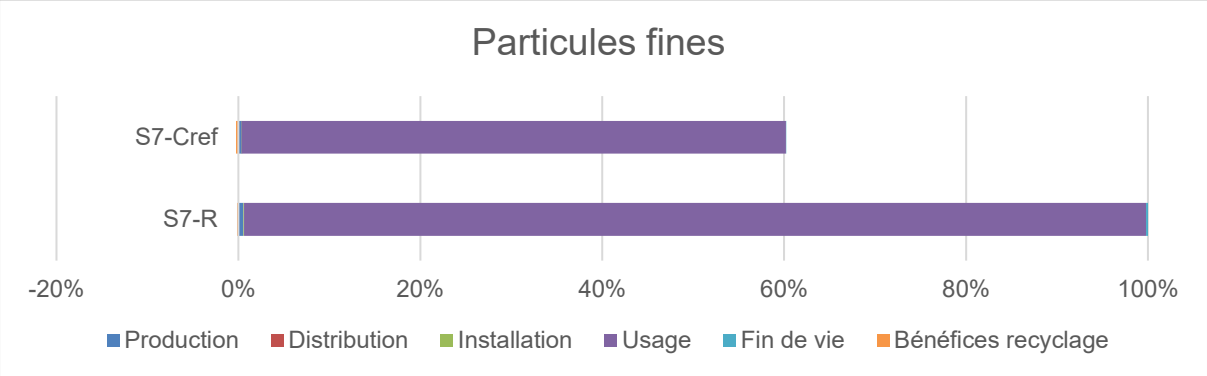


Figure 5-59 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'inverse du changement climatique, la solution S7-R a des impacts plus importants que le scénario conventionnel S7-Cref;
- La raison principale est une consommation plus importante d'électricité d'origine nucléaire ou de cogénération biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat).

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de plus de 95 % des impacts pour tous les scénarios ;
- Les autres étapes, inférieures à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet d'identifier les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-43 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur particules fines

S7 R	S7 Cref	
Consommation électrique de la PAC 95%	Consommation de gaz basse pression	60%
	Emissions directes de la combustion	40%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;

- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission de particules fines lors de la combustion.

Conclusion sur l'indicateur de particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité, de gaz (phase amont) et de la quantité de matériaux utilisés dans la production des réseaux. Le scénario S7-R se distingue du scénario conventionnel S7-C par une consommation plus importante d'électricité.

La consommation d'électricité doit être limitée au maximum pour en améliorer la performance sur cet indicateur.

5.8.3.4 Ressources énergétiques

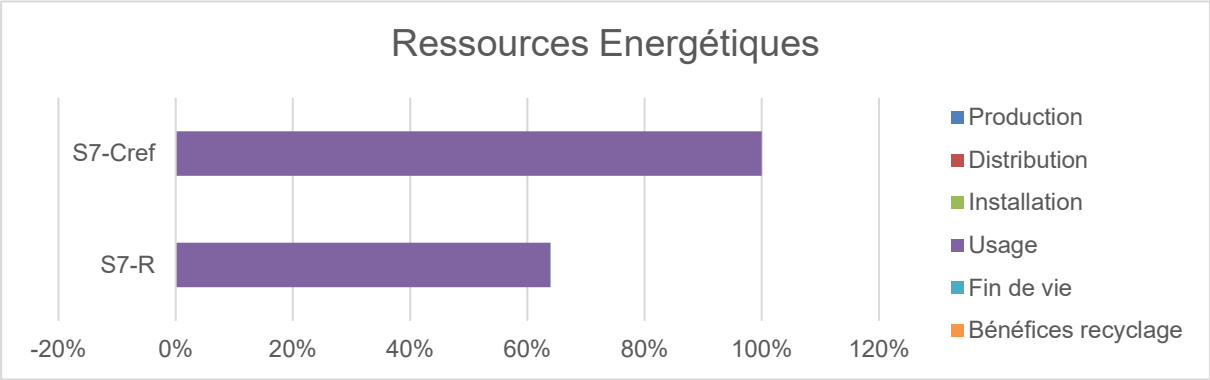


Figure 5-60 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :
- A l'instar du changement climatique, le scénario S7-R est plus performant que sa variante conventionnelle S7-Cref;
- La raison principale est l'intégration de chaleur fatale dite « gratuite » dans le scénario S7-R.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :
- L'étape d'usage est responsable de plus de 95 % pour tous les scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis à vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-44 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques

S7 R		S7 Cref	
Consommation électrique de la PAC	99,9%	Consommation de gaz basse pression	99%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :
- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire ;
- Les impacts de S7-Cref sont causés par l'utilisation de gaz naturel.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les PAC hybrides à absorption sur chaleur fatale ont donc une meilleure performance sur cet indicateur que celle des chaudières gaz. Ce résultat dépend cependant beaucoup du mix électrique considéré. Une analyse de sensibilité est réalisée sur ce mix.

5.8.3.5 Ressources minérales et métalliques

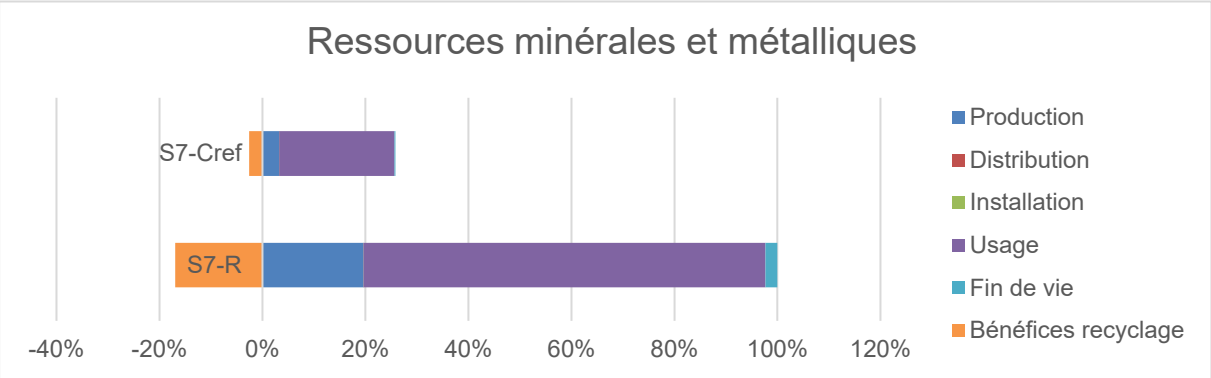


Figure 5-61 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Les solutions à base de chaudières gaz demandent la quantité la plus faible de métaux, et ont donc un impact plus faible ;
- Le mix électrique français repose notamment sur l'utilisation d'uranium pour la filière nucléaire dont l'impact est visible dans cet indicateur
- Enfin, la solution basée sur la pompe à chaleur est la plus impactante

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 75 % pour les 2 scénarios ;
- L'étape de production est quant à elle responsable, dans le scénario S7-R, de 20% de l'impact total

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-45 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques

S7 R		S7 Cref	
Consommation électrique de la PAC	92%	Consommation de gaz basse pression	87%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaine d'approvisionnement du gaz, principalement par la production d'acier et de cuivre utilisés dans les infrastructures ;
- Les impacts de la production de la pompe à chaleur proviennent de sa composition en acier et en cuivre.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz. La consommation d'électricité doit être limitée au maximum pour améliorer leur performance.

5.8.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 7

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 7, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour 5 indicateurs, qui sont responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-46 : Synthèse des contributions dans le cas d'étude 7

Indicateur	Systèmes le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S7-R
Changement climatique	S7-R : PAC Hybride	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage, dues à la combustion de gaz naturel.
Acidification terrestre et eau douce	S7-R : PAC Hybride (écart faible au regard des incertitudes de l'indicateur)	Consommation de gaz et chaine d'approvisionnement du gaz naturel
Particules fines	S7-C : Chaudière gaz	Consommation d'électricité et traitement des résidus d'uranium
Ressources énergétiques	S7-R : PAC Hybride	Consommation d'énergie : gaz ou électricité
Ressources minérales et métalliques	S7-C : Chaudière gaz	Consommation d'électricité et de gaz et leurs chaines d'approvisionnement (réseaux etc.)

Conclusions tous indicateurs confondus

En considérant uniquement les résultats par indicateur, il est difficile de déterminer quels sont les systèmes qui présentent les meilleures performances environnementales. Les conclusions qu'on peut en tirer dépendent donc fortement de l'importance que le décideur souhaite accorder à chaque indicateur. On peut cependant analyser les résultats obtenus sur les indicateurs endpoint, qui permettent d'évaluer les dommages causés par ces systèmes. Les modèles endpoint sont très incertains, et il faut des écarts significatifs pour pouvoir établir une hiérarchie. On se gardera donc de donner des conclusions trop tranchées.

La majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes causés par les systèmes comparés dans ce cas d'étude le sont via les impacts sur le changement climatique, comme le montre une nouvelle fois les deux graphiques suivants, cette fois dans leur unité respective.

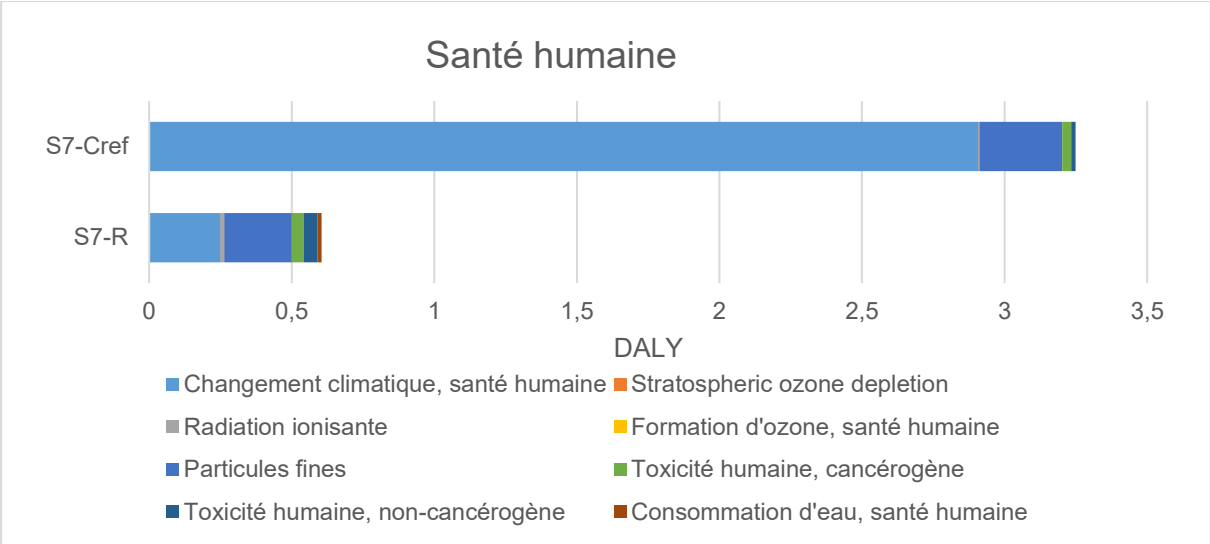


Figure 5-62 : Cas d'étude 7 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

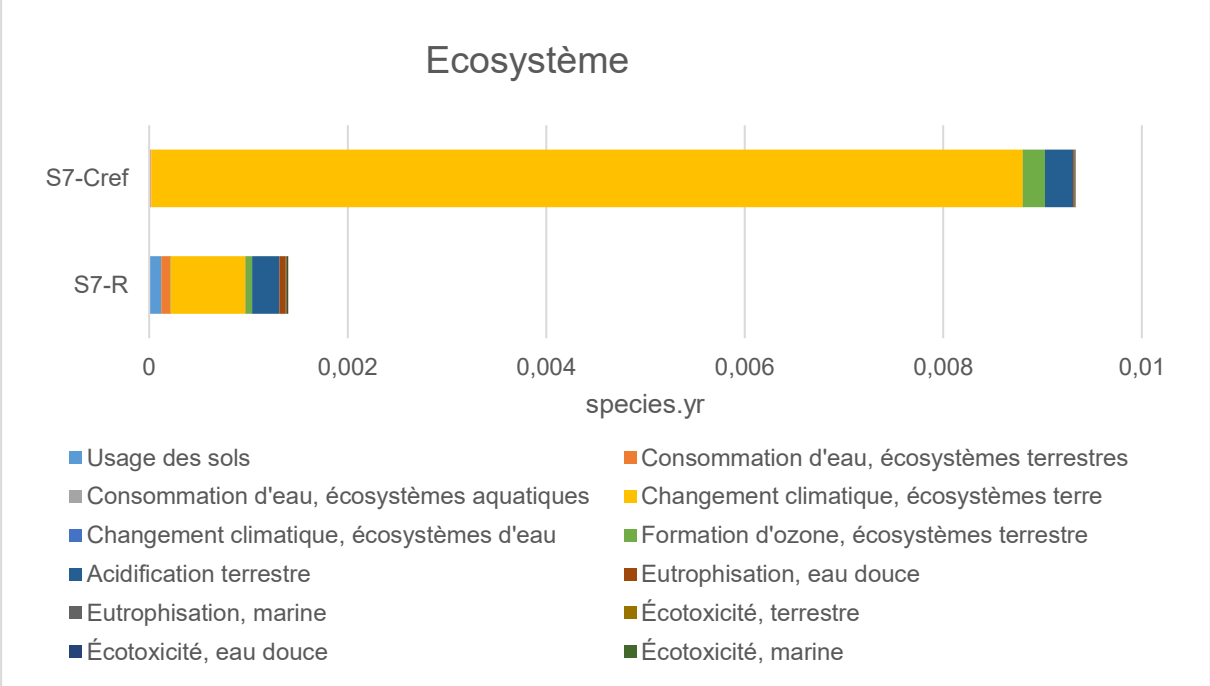


Figure 5-63 : Cas d'étude 7 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

Le système PAC Hybride est le plus performant sur le changement climatique, et bien qu'il soit moins performant sur les indicateurs d'acidification et de particules fines, on peut considérer que ces systèmes causent globalement moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que le système à base de chaudières gaz. Concernant les ressources naturelles, les systèmes à base de chaudières contribuent davantage à l'épuisement des ressources fossiles et la PAC hybride qui fonctionne partiellement sur une source d'énergie fatale contribue davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Au vu de l'important écart en ressources énergétiques expliqué par la consommation d'énergie fatale gratuite, une analyse de sensibilité est réalisée sur la nature de cette énergie en faisant jouer le facteur B. **Une analyse de sensibilité est aussi réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.
Enfin, pour tester ces hypothèses sur d'autres gammes de température, une sensibilité à plus ou moins 5 degrés a été menée sur la température d'approvisionnement de l'eau.

5.9 Cas d'étude 8

Rappel des configurations des scénarios :

- S8-R : groupe froid à l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante ;
- S8-Cref : chaudière gaz et groupe froid à l'ammoniac sur tour aéroréfrigérante.

5.9.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 8 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-47 : Cas d'étude 8 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S8-R	S8-Cref
Changement climatique	15%	100%
Destruction de la couche d'ozone	35%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	98%	100%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	36%	100%
Particules fines	76%	100%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	80%	100%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	76%	100%
Acidification terrestre et eau douce	64%	100%
Eutrophisation, eau douce	86%	100%
Eutrophisation, marine	52%	100%
Eutrophisation, terrestre	63%	100%
Ecotoxicité, eau douce	80%	100%
Usage des sols	94%	100%
Consommation d'eau	95%	100%
Ressources énergétiques	57%	100%
Ressources minérales et métalliques	78%	100%

Ce premier tableau nous montre que le scénario S8-R est moins impactant ou égal (vis-à-vis des incertitudes) que le S8-Cref sur la totalité des indicateurs d'impacts sélectionnés. Afin de comprendre ces résultats, de premières analyses permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, les analyses de contribution permettent ensuite de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.9.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 8 sur chacun des impacts endpoint considérés.

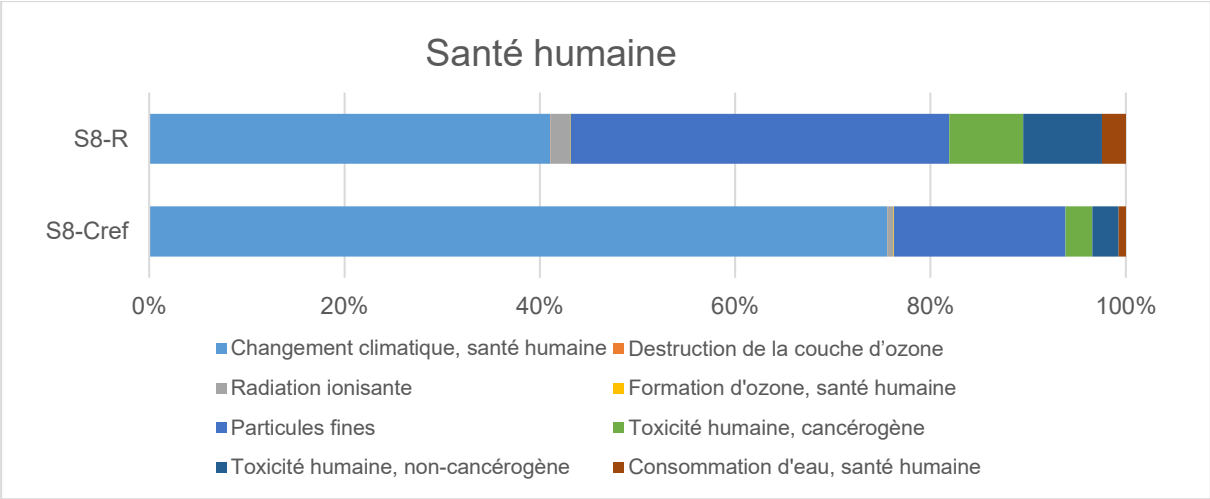


Figure 5-64 : Cas d'étude 8 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique et les émissions de particules fines. Suivent dans un second ordre ceux liés aux indicateurs de toxicité humaine.

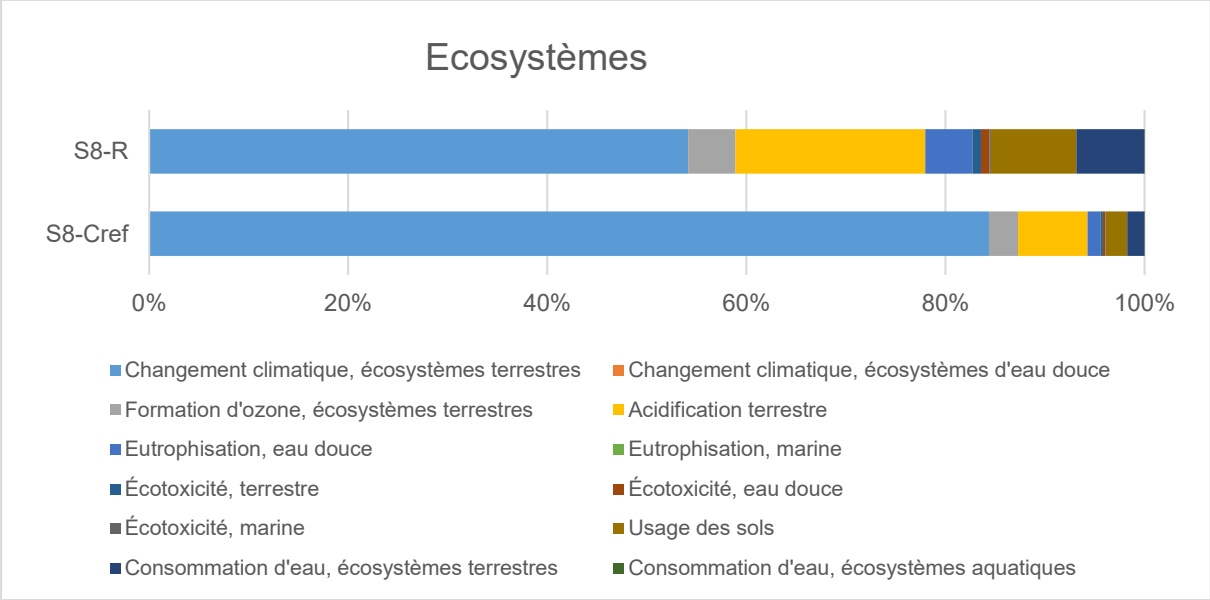


Figure 5-65 : Cas d'étude 8 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Suivis dans un second ordre par l'indicateur d'émission de particules fines et dans une moindre mesure les indicateurs d'usage des sols, d'eutrophisation d'eau douce et de formation d'ozone.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 8 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Particules fines ;

- Acidification terrestre et eau douce ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.9.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.9.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 8 sur l'indicateur de changement climatique.

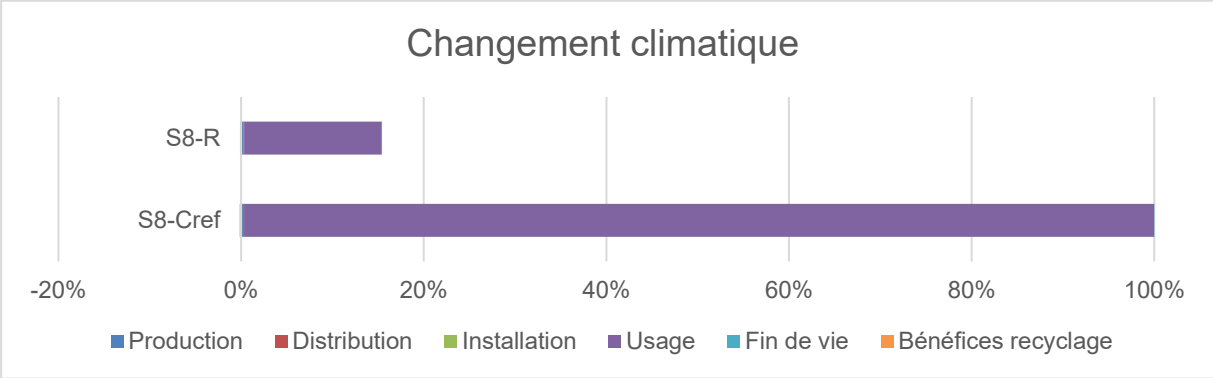


Figure 5-66 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario à base de groupes froid en thermo-frigo-pompe (S8-R) est environ 4,5 fois plus performant que le scénario avec chaudière gaz et groupe froid aérothermie (S8-Cref) ;
- La raison principale est une demande importante en gaz naturel du S8-Cref ajoutée à une consommation électrique équivalente.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 99 % des impacts pour chaque scénario ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-48 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S8 R		**S8 Cref**	
Consommation électrique des TFP	88%	Emissions liées à la combustion du gaz	71%
		Emissions liées à la distribution du gaz en amont	14%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la consommation électrique des TFP sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon et à gaz dans le mix électrique français ;
- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité et de gaz naturel consommée. Le scénario S8-Cref composé de groupes froid aérothermiques et d'une chaufferie gaz est le scénario le plus émetteurs de CO_2 eq, causé par la combustion du gaz naturel, bien plus impactant sur le changement climatique que l'électricité française.

Les TFP ont donc une performance carbone supérieure à celle des groupes froids et chaufferie gaz. La consommation électrique doit être limitée pour en améliorer encore la performance carbone.

5.9.3.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'émission de particules fines.

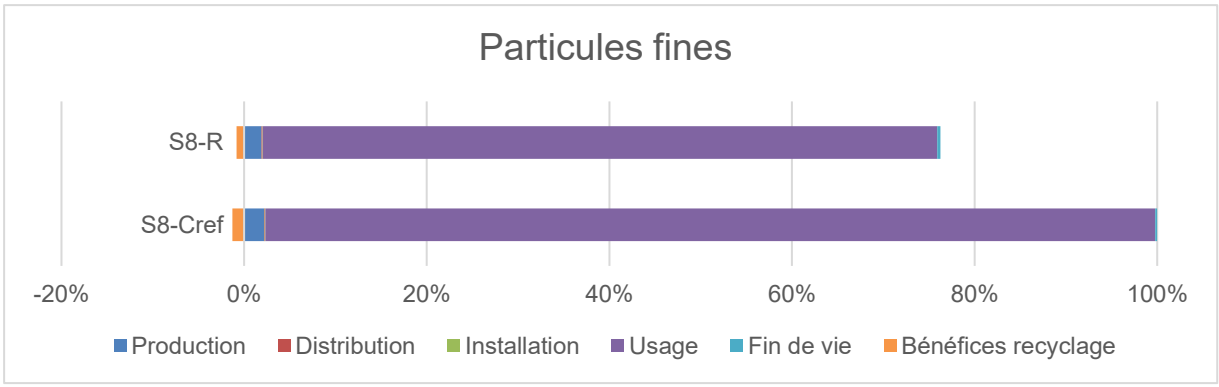


Figure 5-67 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La scénario à base de thermo-frigo-pompe (S8-R) est plus performant que le scénario à base d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid (S8-Cref) ;
- La raison principale est une demande importante en gaz naturel du S8-Cref ajoutée à une consommation électrique équivalente.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de plus de 97 % des impacts des deux scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-49 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

S8 R		**S8 Cref**	
Consommation électrique des TFP	86%	Consommation électrique des GF	55%
		Consommation électrique des pompes réseau	20%
		Emissions liées à la distribution du gaz en amont	13%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et

émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …).

Conclusion sur l'indicateur d'émission particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité consommée. Le scénario à base de thermo-frigo-pompe (S8-R) est plus performant que le scénario à base d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid (S8-Cref), notamment par l'absence de consommation de gaz, malgré une consommation électrique globale équivalente (pompes, GF et TFP).

La thermo-frigo-pompe a donc une performance supérieure à la combinaison d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid. Une réduction de la consommation électrique ou l'utilisation d'un mix électrique contenant moins de biogaz sont recommandés pour améliorer encore la performance du S8-R.

5.9.3.3 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce.

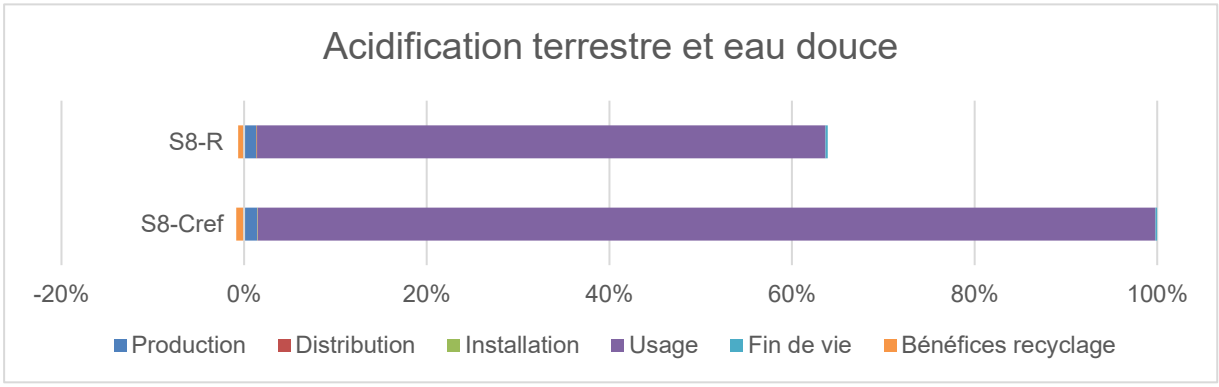


Figure 5-68 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :
- Le scénario à base de thermo-frigo-pompe (S8-R) est plus performant que le scénario à base d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid (S8-Cref) ;
- La raison principale est une demande importante en gaz naturel du S8-Cref ajoutée à une consommation électrique équivalente.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :
- L'étape d'usage est responsable à elle seule de plus de 98 % des impacts des deux scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-50 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

S8 R		**S8 Cref**	
Consommation électrique des TFP	86%	Consommation électrique des GF	47%
		Emissions liées à la distribution du gaz en amont	28%

Les analyses de ces différents procédés ont permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, groupe froid et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon (émission de dioxyde de soufre dans l'air) et des centrales à biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) dans le mix électrique français
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'émission de dioxyde souffre et d'oxyde d'azote dans l'air dans la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …).

Conclusion sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

Les différentes analyses permettent de démontrer que la principale source de pollution, dans les 2 scénarios, est le mix électrique. Dans chacun des scénarios, la consommation électrique est similaire et se situe aux alentours d'1,7 GWh. Cependant, dans le scénario Créf, il faut également ajouter les impacts issus de la production en amont du gaz qui explique la différence entre les 2 scénarios.

La consommation électrique doit être limitée pour améliorer encore la performance du S8-R.

5.9.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

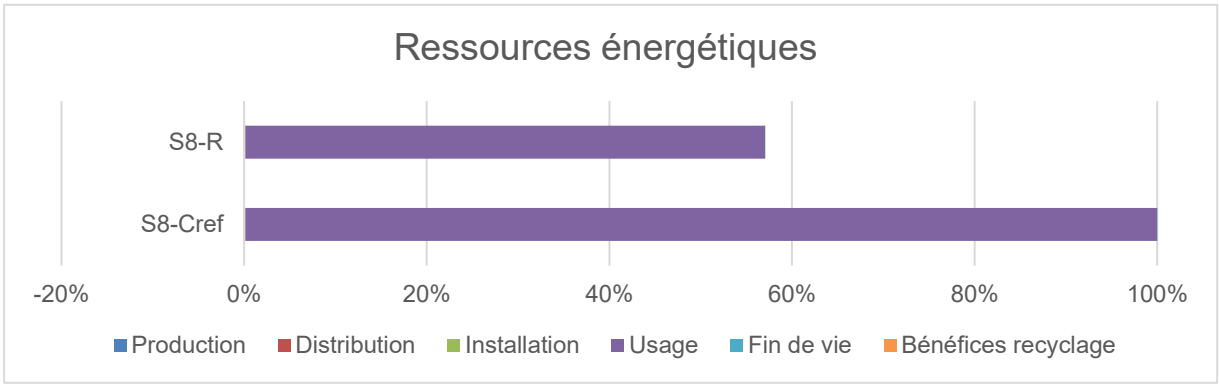


Figure 5-69 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :
- Le scénario à base de thermo-frigo-pompe (S8-R) est plus performant que le scénario à base d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid (S8-Cref) ;
- La raison principale est une demande importante en gaz naturel du S8-Cref ajoutée à une consommation électrique équivalente.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :
- L'étape d'usage est responsable de plus de 99 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-51 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

S8 R		**S8 Cref**	
Consommation électrique des TFP	89 %	Consommation électrique des GF	42%
		Emissions liées à la distribution du gaz en amont	42%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (GF et pompes réseau) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'utilisation de gaz naturel.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité et de gaz naturel consommée. Le scénario S8-Cref composé de groupes froid aérothermiques et d'une chaufferie gaz est le scénario le plus impactant, causé par l'impact de la distribution du gaz naturel, venant s'ajouter à la consommation électrique identique au scénario S8-R.

Les TFP ont donc une performance carbone supérieure à celle des groupes froids et chaufferie gaz. La consommation électrique doit être limitée pour en améliorer encore la performance.

5.9.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques.

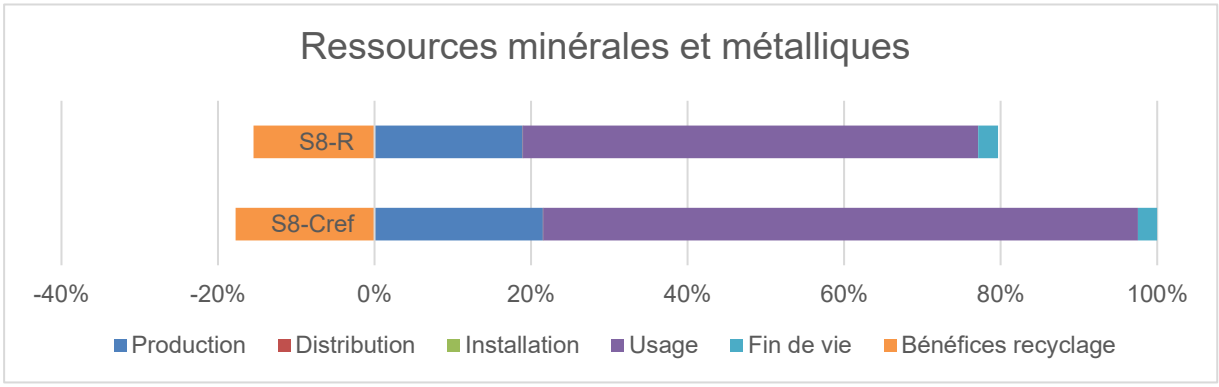


Figure 5-70 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario à base de thermo-frigo-pompe (S8-R) est plus performant que le scénario à base d'une chaufferie gaz et d'un groupe froid (S8-Cref) ;
- La raison principale est une demande importante en gaz naturel du S8-Cref ajoutée à une consommation électrique équivalente.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de 73 à 76 % de l'impact des deux scénarios ;
- L'étape de production est responsable enter 22 % et 24 % de l'impact des deux scénarios ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter entre 18 et 20 % de l'impact des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-52 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

S8 R		**S8 Cref**	
Consommation électrique des TFP	81 %	Consommation électrique des GF	65%
		Consommation électrique des pompes réseau	19%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (TFP, GF et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de cuivre et de plomb dans les différentes étapes du procédé, notamment la production des réseaux électriques.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité d'électricité et de gaz naturel consommée. Le scénario S8-Cref composé de groupes froid aérothermiques et d'une chaufferie gaz est le scénario le plus impactant, causé par l'impact de la distribution du gaz naturel, venant s'ajouter à la consommation électrique identique au scénario S8-R.

Les TFP, avec comme source une nappe phréatique, ont donc une performance carbone supérieure à celle des groupes froids et chaufferie gaz. La consommation électrique doit être limitée pour en améliorer encore la performance.

5.9.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 8

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 8, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour les 5 indicateurs responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	Systèmes le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S8-R
Changement climatique	S8-R	Consommation électrique des TFP
Particules fines		
Acidification terrestre et eau douce		
Ressources énergétiques		
Ressources minérales et métalliques		

Conclusions tous indicateurs confondus

Le système S8-R est plus performant que le système S8-Cref dans toutes les catégories d'impact étudiées. Le groupe froid à l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante est donc plus performant qu'une chaudière gaz et groupe froid à l'ammoniac sur tour aéroréfrigérante. Dans les deux scénarios, ce sont les consommations électriques qui sont les principales contributrices pour les impacts étudiés TFP ou GF.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique avec un Mix par usage « industrie » peu carboné et un mix par usage « chauffage » pour la sensibilité d'un mix très fossile et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.
Enfin, pour tester ces hypothèses sur d'autres gammes de température, une sensibilité à plus ou moins 5 degrés a été menée sur la température d'approvisionnement de l'eau.

5.10 Cas d'étude 9

Pour rappel, le cas d'étude 9 est constitué des scénarios suivants :

- Système S9-R : centrale solaire thermique avec capteurs plans grande surface ;
- Système S9-Cref : chaudière gaz.

5.10.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 9 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Figure 5-71 : Cas d'étude 9 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S9-R	S9-Cref
Changement climatique	51%	100%
Destruction de la couche d'ozone	50%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	26%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	62%	100%
Particules fines	100%	76%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	25%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	21%
Acidification terrestre et eau douce	75%	100%
Eutrophisation, eau douce	100%	34%
Eutrophisation, marine	66%	100%
Eutrophisation, terrestre	68%	100%
Ecotoxicité, eau douce	100%	26%
Usage des sols	100%	17%
Consommation d'eau	100%	42%
Ressources énergétiques	53%	100%
Ressources minérales et métalliques	100%	39%

Ce premier tableau permet de constater qu'aucun des 2 scénarios ne prévaut sur l'autre en termes de bénéfices environnementaux : le scénario le plus performant varie selon l'indicateur considéré. Il est donc particulièrement important de regarder la contribution de ces indicateurs sur les dommages endpoint.

5.10.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 9 sur chacun des impacts endpoint considérés.

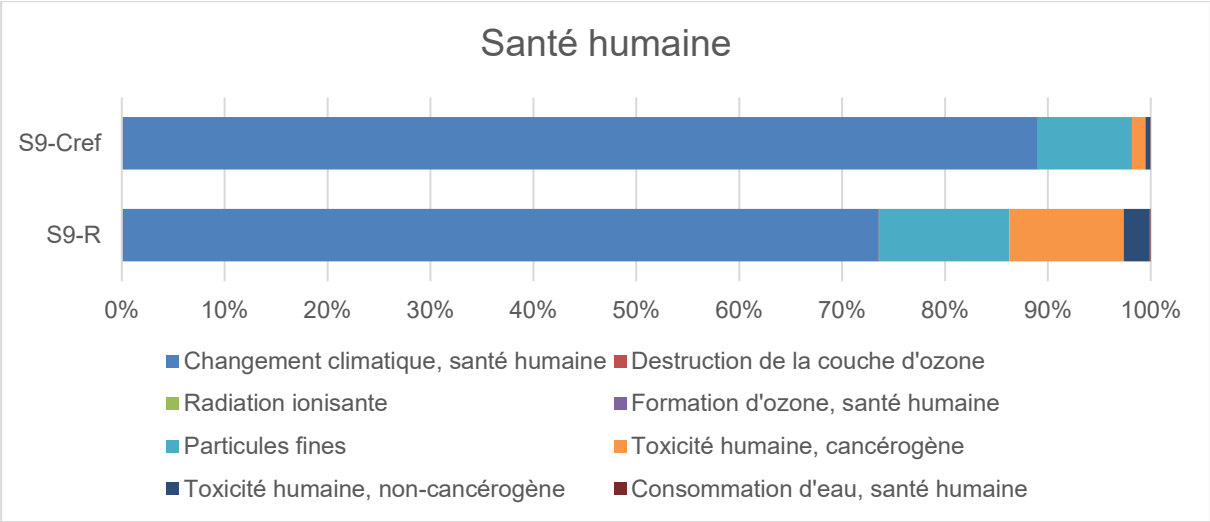


Figure 5-72 : Cas d'étude 9 : Contribution aux dommages sur la santé humaine

Pour les deux scénarios, l'indicateur du changement climatique est le plus contributeur aux dommages sur la santé humaine.

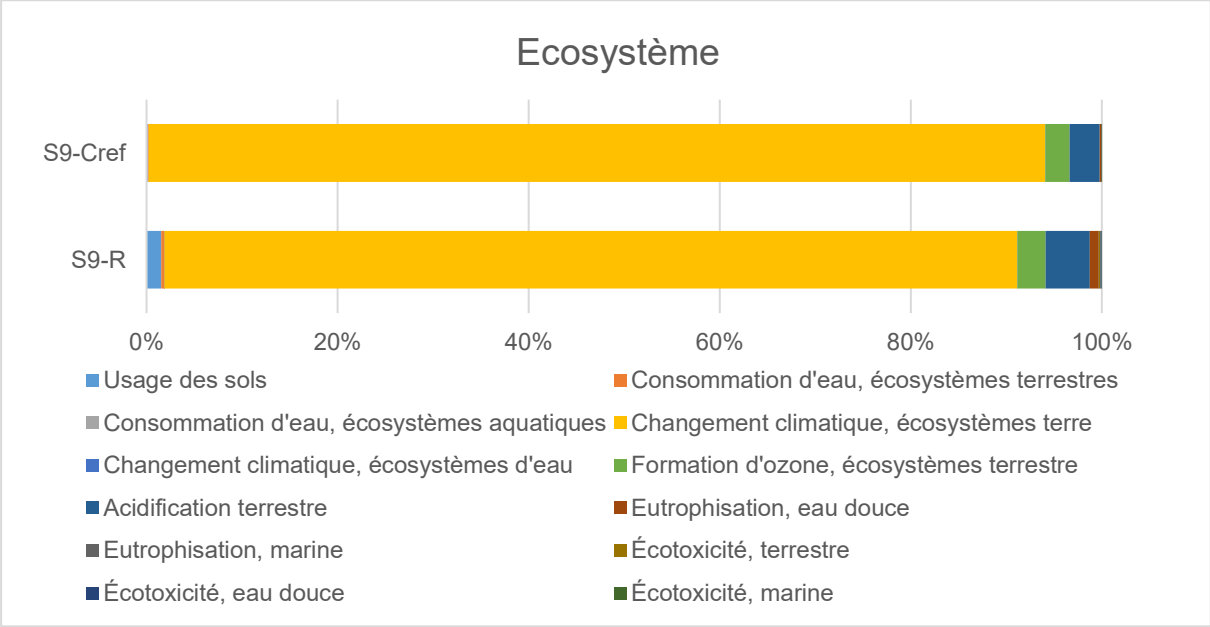


Figure 5-73 : Cas d'étude 9 : Contribution aux dommages sur les écosystèmes

Comme dans le cas de la santé humaine, ce sont les impacts du changement climatique qui contribuent le plus aux dommages sur les écosystèmes.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 9 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.10.3 Analyse de contribution sur les indicateurs les plus pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.10.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 9 sur l'indicateur de changement climatique.

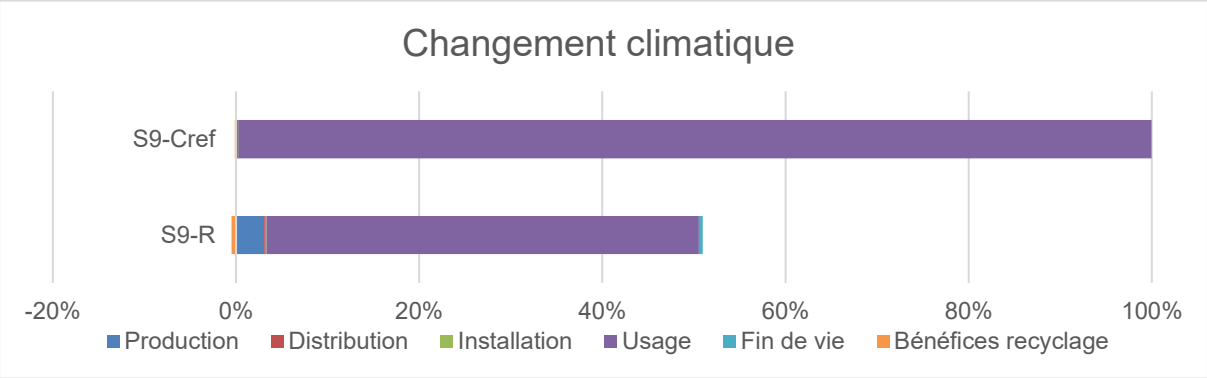


Figure 5-74 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur du changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution renouvelable S9-R est plus performante sur l'impact changement climatique en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz, réduisant celui-ci de moitié ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- Dans les 2 scénarios, c'est la phase d'usage qui contribue le plus aux impacts finaux et notamment la consommation énergétique.

S9 R		S9 Cref	
Emissions directes de la consommation de gaz	78%	Emissions directes de la combustion de gaz	84%
Consommation de gaz	15%		

Dans les 2 scénarios, c'est la consommation de gaz et notamment les émissions directes dans l'air qui contribuent aux impacts sur le changement climatique. Etant donné que dans le scénario S9-R, une partie de la production de chaleur est fournie par du solaire, la consommation de gaz est environ deux fois moins importante que dans le scénario S9-Créf où la chaleur est exclusivement fournie par du gaz naturel. Le scénario S9-R est donc deux fois plus performant que le scénario S9-Créf.

5.10.3.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 9 sur l'indicateur de ressources énergétiques, qui prend en compte les flux d'énergie fossile.

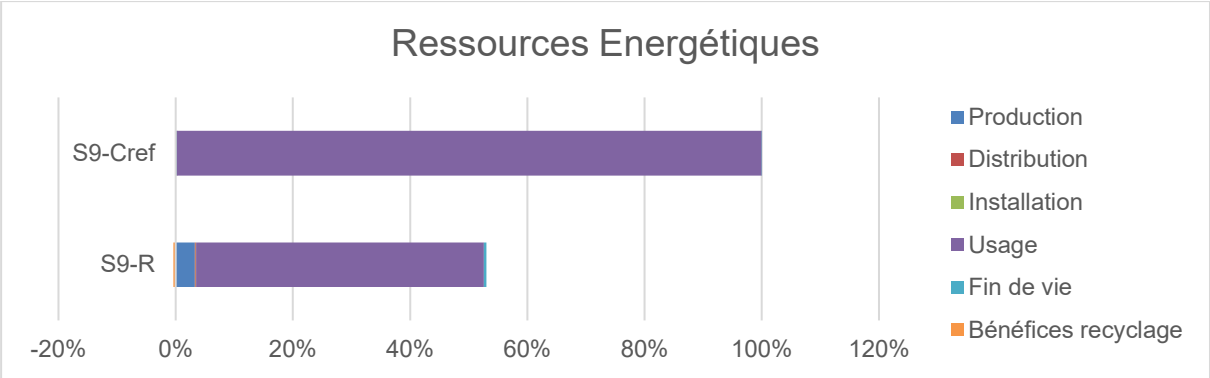


Figure 5-75 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'instar du changement climatique, la solution S9-R (solaire) est plus performante sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz, réduisant celui-ci de moitié. L'indicateur se tournant vers la consommation d'énergie primaire fossile, il était assez attendu d'obtenir un impact réduit sur le scénario solaire.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- A l'instar du changement climatique, c'est la phase d'usage qui contribue à la très grande majorité des impacts sur les ressources énergétiques.

S9 R		S9 Cref	
Consommation de gaz	89%	Consommation de gaz	99%

Pour les 2 scénarios, ces impacts proviennent de la consommation de gaz naturel dans les 2 systèmes. Comme le scénario S9-R demande deux fois moins de gaz que S9-Créf, il est deux fois moins impactant sur cet indicateur.

5.10.3.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 9 sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

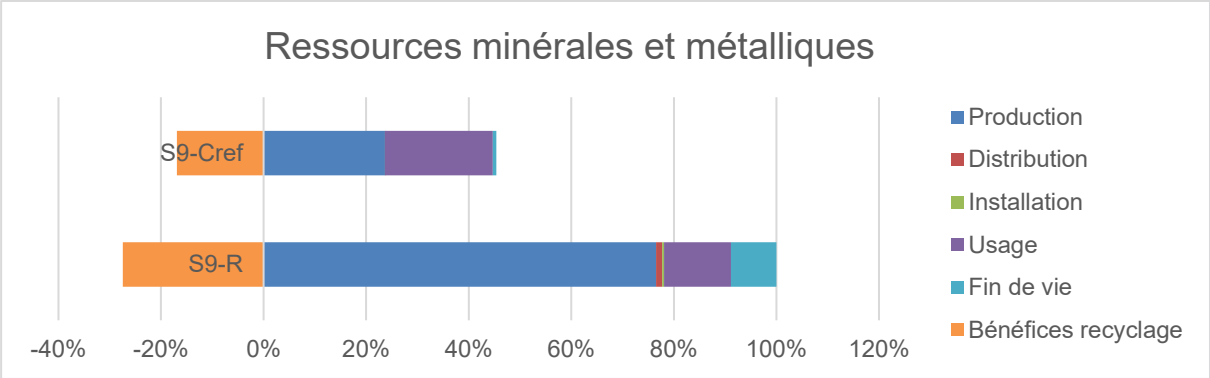


Figure 5-76 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Contrairement aux indicateurs précédents, la solution S9-R (solaire) est moins performante sur l'impact épuisement des ressources minérales et métalliques en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- Dans les 2 scénarios, c'est la phase de production qui contribue le plus aux impacts sur les ressources minérales et métalliques.
- Dans le scénario S9-Cref, la partie usage reste très importante, liée à la consommation de gaz.
- Le recyclage permet d'éviter entre 25 et 15% de l'impact.

S9 R		S9 Cref	
Production des ballons tampons	49%	Consommation de gaz	65%
Production des panneaux	18%		
Consommation de gaz	12%	Cheminée	18%
Consommation des pompes du réseau	5%		

Le scénario S9-R demande des infrastructures supplémentaires que le scénario S9-Créf : la production des ballons tampons en acier ainsi que la production des panneaux solaires induisent une plus grande déplétion en ressources minérales et en métaux. Ainsi, le scénario S9-R est environ deux fois plus impactant que le scénario S9-Créf.

5.10.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 9

Synthèse des résultats par indicateur

L'analyse de contribution sur les indicateurs les plus pertinents a montré l'influence de la consommation de gaz naturel pendant la phase d'usage dans les 2 scénarios, et plus particulièrement dans les indicateurs changement climatique et ressources énergétiques. Le scénario S9-R consommant deux fois moins de gaz, présente des impacts deux fois plus faibles pour ces deux indicateurs qui contribuent largement aux indicateurs endpoint de santé humaine et écosystèmes. Dans le cas de l'indicateur ressources minérales et métalliques, ce sont les matériaux utilisés dans les infrastructures qui contribuent aux impacts notamment les ballons tampons et les panneaux solaires dans S9-R.

Indicateur	Systèmes le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S9-R
Changement climatique	Capteurs plans grande surface (S9-R)	Consommation de gaz naturel
Ressources énergétiques		
Ressources minérales et métalliques	Chaudière gaz (S9-C)	Consommation d'acier

Conclusions tous indicateurs confondus

Le système S9-R est plus performant que le système S9-Cref dans toutes les catégories d'impact étudiées, excepté sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques. D'après les résultats endpoints présentés au § 5.10.2, la majorité des dommages causés par les systèmes comparés aux ressources le sont via les impacts sur l'épuisement des ressources énergétiques et la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes le sont via les impacts sur le changement climatique, comme le montre une nouvelle fois les deux graphiques suivants, cette fois dans leur unité respective.

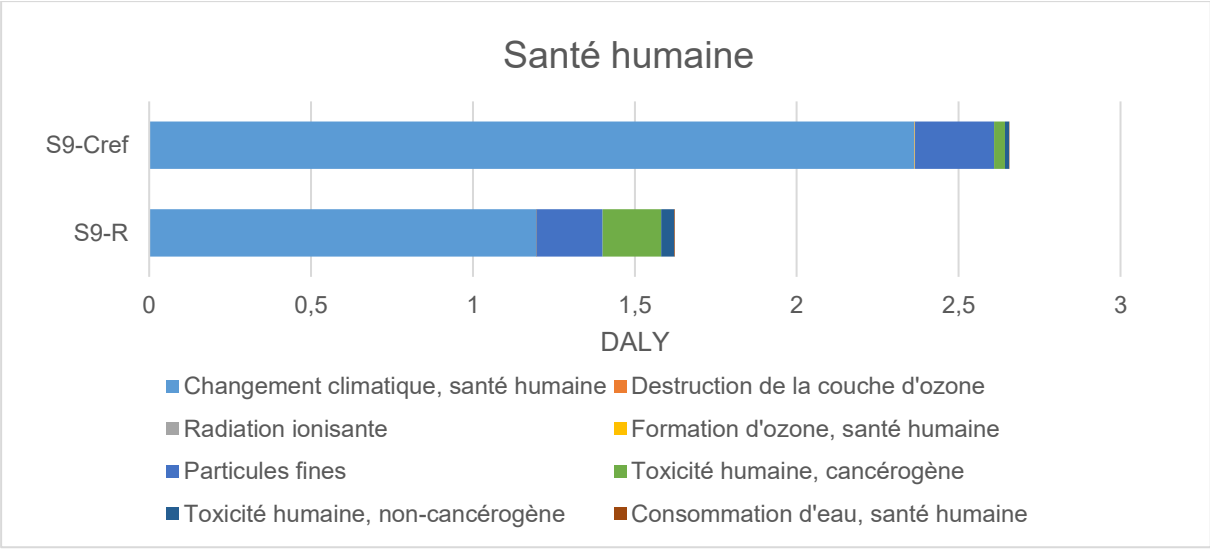


Figure 5-77 : Cas d'étude 9 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

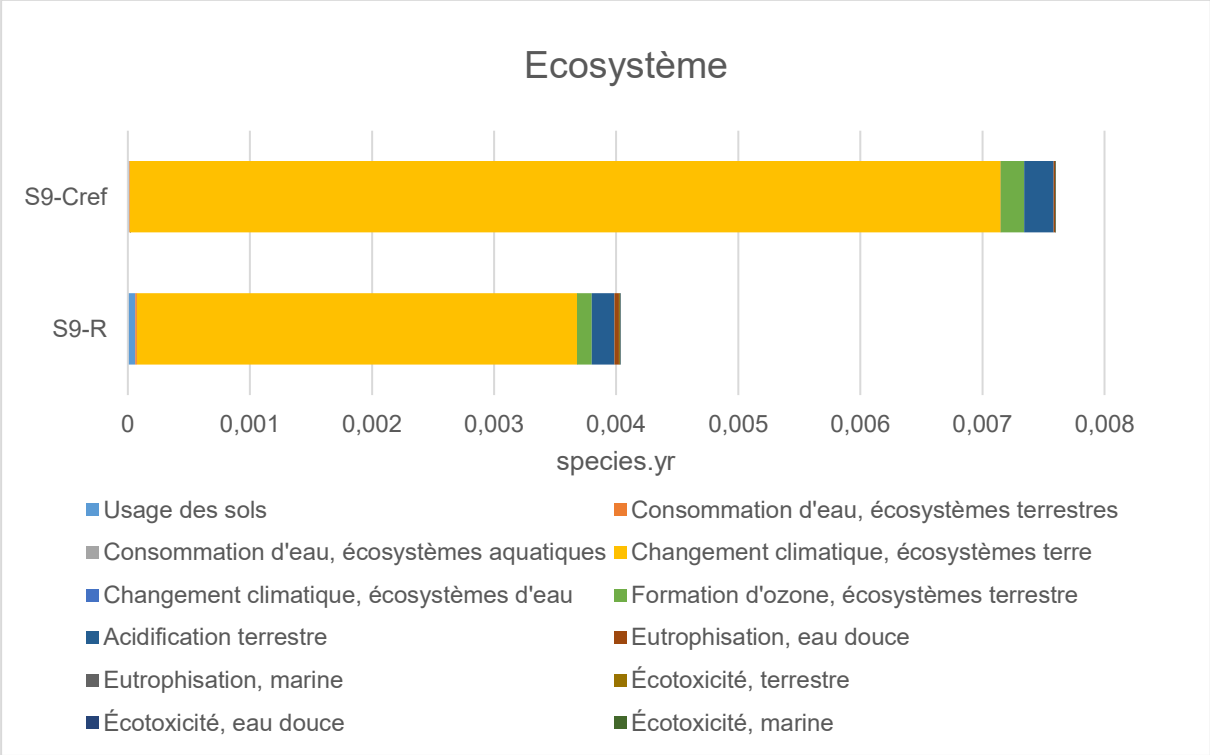


Figure 5-78 : Cas d'étude 9 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

Le système à base de capteurs solaire plans grande surface est le plus performant sur ces indicateurs au vu de sa bien moindre consommation de gaz naturel. Concernant les ressources naturelles, la conclusion est changée au vu de la consommation plus importante du scénario solaire en acier pour le stockage d'eau chaude notamment.

<u>Analyses de sensibilité à réaliser</u>

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Au vu de l'importance du complément gaz, une analyse de sensibilité est réalisée sur le taux de couverture solaire du scénario S9-R. **Une analyse de sensibilité est aussi réalisée sur le mix**

électrique avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

La forte contribution des infrastructures sur les scénarios solaires amène également à considérer une analyse de sensibilité sur les taux de recyclage des panneaux.

5.11 Cas d'étude 10

Pour rappel, le cas d'étude 10 est constitué des scénarios suivants :

- Système S10-R : Centrale solaire thermique avec capteurs sous vide ;
- Système S10-Cref : Chaudière gaz.

5.11.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 10 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-53 : Cas d'étude 10 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S10-R	S10-Cref
Changement climatique	70%	100%
Destruction de la couche d'ozone	69%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	41%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	97%	100%
Particules fines	100%	55%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	17%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	16%
Acidification terrestre et eau douce	100%	84%
Eutrophisation, eau douce	100%	22%
Eutrophisation, marine	100%	88%
Eutrophisation, terrestre	100%	90%
Ecotoxicité, eau douce	100%	19%
Usage des sols	100%	14%
Consommation d'eau	100%	36%
Ressources énergétiques	75%	100%
Ressources minérales et métalliques	100%	21%

Ce premier tableau permet de constater que le scénario S10-Créf est plus performant dans une grande majorité des indicateurs. Il est cependant important de regarder quels sont les indicateurs les plus contributeurs aux dommages endpoint.

5.11.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des deux scénarios du cas d'étude 10 sur chacun des impacts endpoint considérés.

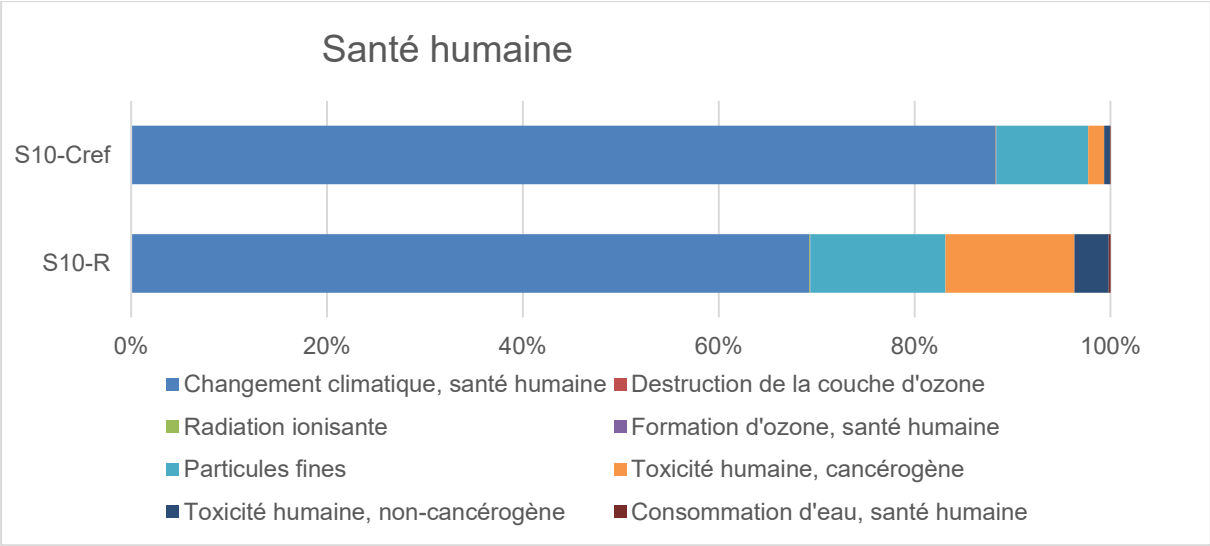


Figure 5-79 : Cas d'étude 10 : contribution des indicateurs midpoint sur la santé humaine

Les dommages sur la santé humaine proviennent majoritairement de l'indicateur changement climatique.

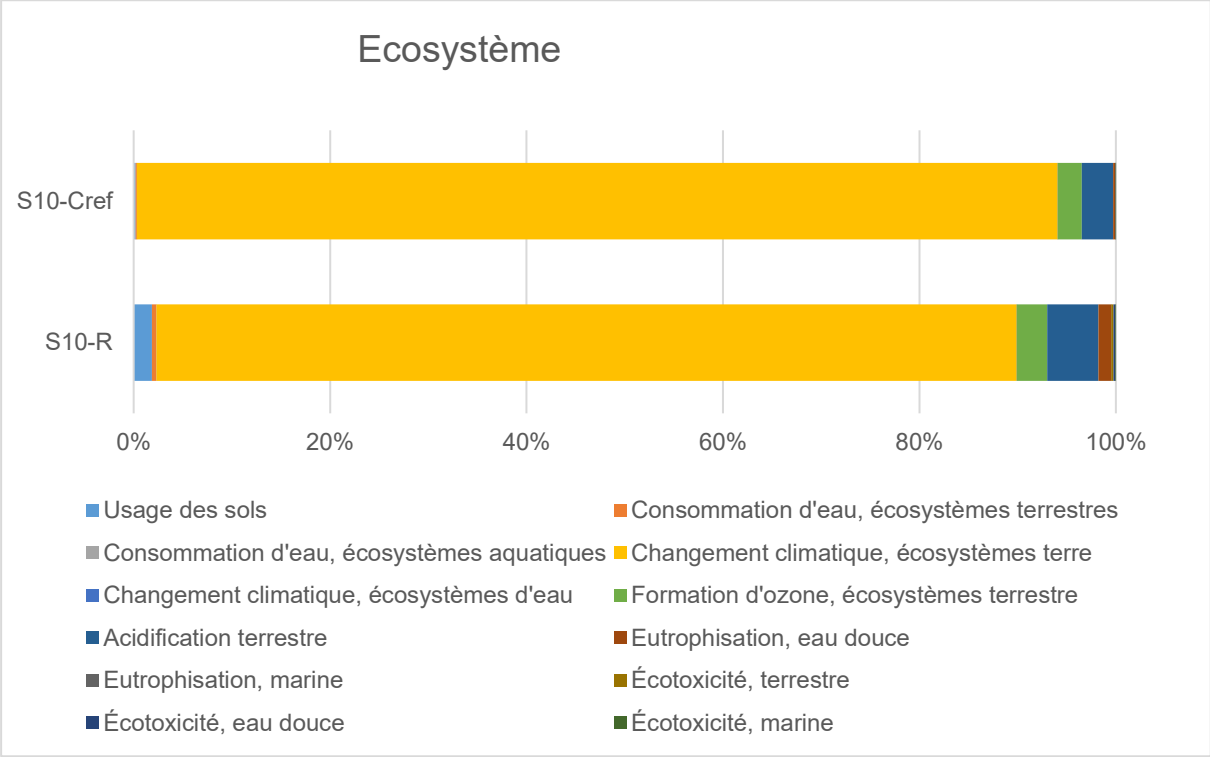


Figure 5-80 : Cas d'étude 10 : contribution des indicateurs midpoint sur les écosystèmes

Les dommages sur la santé humaine proviennent majoritairement de l'indicateur changement climatique.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 10 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.11.3 Analyse de contribution sur les indicateurs les plus pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.11.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 10 sur l'indicateur de changement climatique.

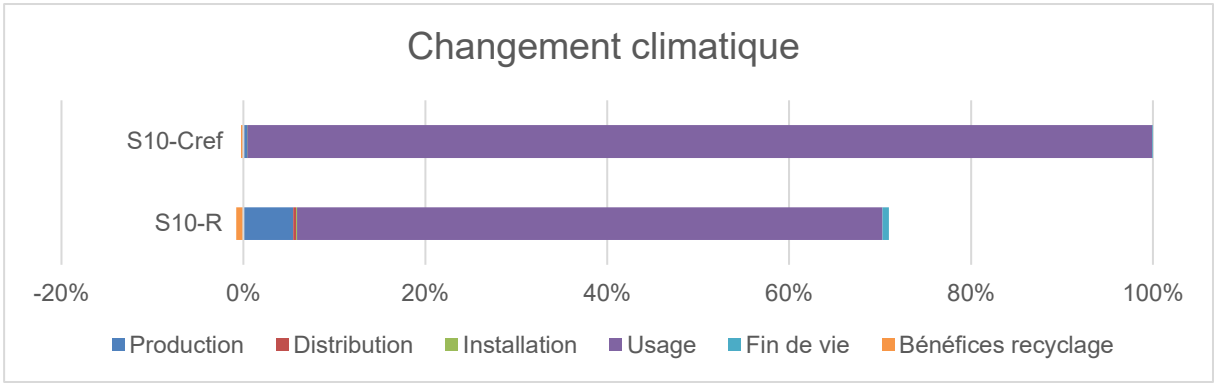


Figure 5-81 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur du changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- La solution S10-R (solaire) est plus performante sur l'indicateur de changement climatique en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz, réduisant celui-ci de 30%.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- Dans les 2 scénarios, c'est la phase d'usage qui contribue le plus aux impacts finaux et notamment la consommation énergétique.

S10 R		S10 Cref	
Emissions directes	76%	Emissions directes de gaz naturel	83%
Consommation de gaz	15%		

Dans les 2 scénarios, c'est la consommation de gaz et notamment les émissions directes dans l'air qui contribuent aux impacts sur le changement climatique. Etant donné que dans le scénario S10-R, une partie de la production de chaleur est fournie par du solaire, la consommation de gaz est environ 30 % moins importante que dans le scénario S10-Créf où la chaleur est exclusivement fournie par du gaz naturel. Le scénario S10-R est donc 30 % plus performant que le scénario S10-Créf.

5.11.3.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 10 sur l'indicateur de ressources énergétiques.

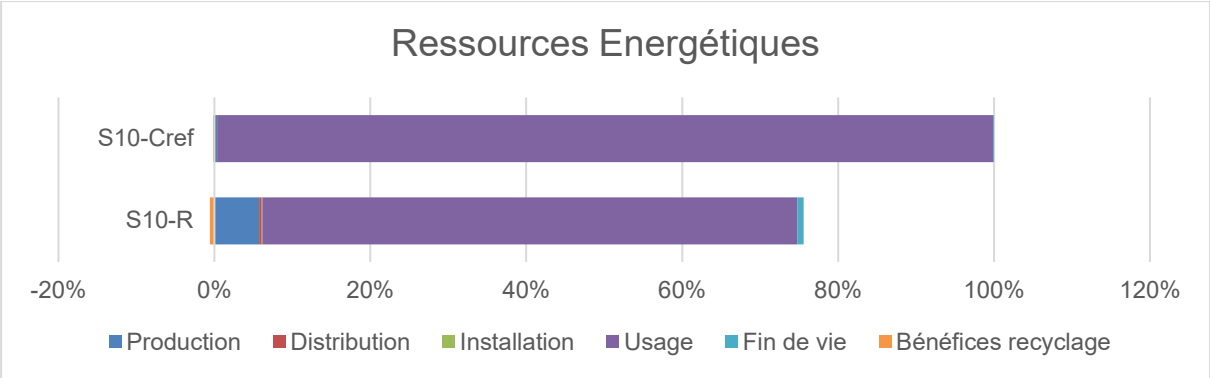


Figure 5-82 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- A l'instar du changement climatique, la solution S10-R (solaire) est plus performante sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz, réduisant celui-ci d'environ 30%. L'indicateur se tournant vers la consommation d'énergie primaire fossile, il était assez attendu d'obtenir un impact réduit sur le scénario solaire.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- A l'instar du changement climatique, c'est la phase d'usage qui contribue à la très grande majorité des impacts sur les ressources énergétiques.

S10 R		**S10 Cref**	
Consommation de gaz	83%	Consommation du gaz	97%

Pour les 2 scénarios, ces impacts proviennent de la consommation de gaz naturel dans les 2 systèmes. Comme le scénario S10-R demande 30% moins de gaz que S10-Créf, il est donc moins impactant sur cet indicateur.

5.11.3.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 10 sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

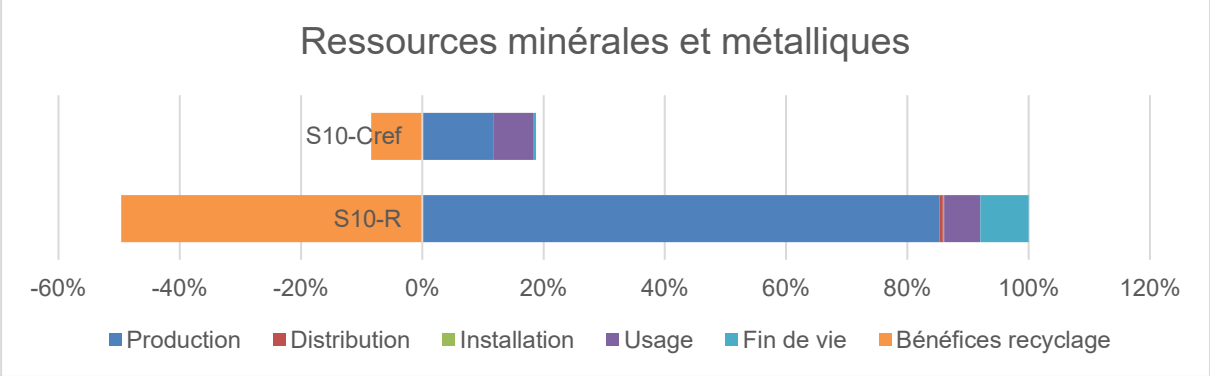


Figure 5-83 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Contrairement aux impacts précédents, la solution S10-R (solaire) est moins performante sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en comparaison avec la solution conventionnelle basée sur des chaudières gaz.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- Dans les 2 scénarios, c'est la phase de production qui contribue le plus aux impacts sur les ressources minérales et métalliques.
- La phase d'usage contribue cependant à près de 30% du scénario basé sur des chaudières gaz (S10-Cref)

S10 R		S10 Cref	
Production des capteurs solaires	44%	Consommation de gaz	48%
Production des ballons	36%	Infrastructure (cheminée + régulation)	33%

Le scénario S10-R demande des infrastructures supplémentaires que le scénario S10-Créf : la production des panneaux solaires ainsi que la production des ballons tampons induisent une plus grande déplétion en ressources minérales et en métaux. Ainsi, le scénario S10-R est environ deux fois plus impactant que le scénario S10-Créf en prenant en compte les bénéfices du recyclage.

5.11.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 10

Synthèse des résultats par indicateur

L'analyse de contribution sur les indicateurs les plus pertinents a montré l'influence de la consommation de gaz naturel pendant la phase d'usage dans les 2 scénarios, et plus particulièrement dans les indicateurs changement climatique et ressources énergétiques. Le scénario S10-R consommant fois moins de gaz, présente des impacts plus faibles pour ces deux indicateurs qui contribuent largement aux indicateurs endpoint de santé humaine et écosystèmes. Dans le cas de l'indicateur ressources minérales et métalliques, ce sont les matériaux utilisés dans les infrastructures qui contribuent aux impacts notamment les ballons tampons et les panneaux solaires dans S10-R.

Indicateur	Système le plus performant	Principale source de l'impact du système étudié S10-R
Changement climatique	Capteurs sous vide (S10-R)	Consommation de gaz naturel
Ressources énergétiques		
Ressources minérales et métalliques	Chaudière gaz (S10-Cref)	Consommation d'acier

Conclusions tous indicateurs confondus

Le système S10-R est plus performant que le système S10-Cref dans toutes les catégories d'impact étudiées, excepté sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques. D'après les résultats endpoint présentés en 5.11.2, la majorité des dommages causés par les systèmes comparés aux ressources le sont via les impacts sur l'épuisement des ressources énergétiques et la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes le sont via les impacts sur le changement climatique, comme le montre une nouvelle fois les deux graphiques suivants, cette fois dans leur unité respective.

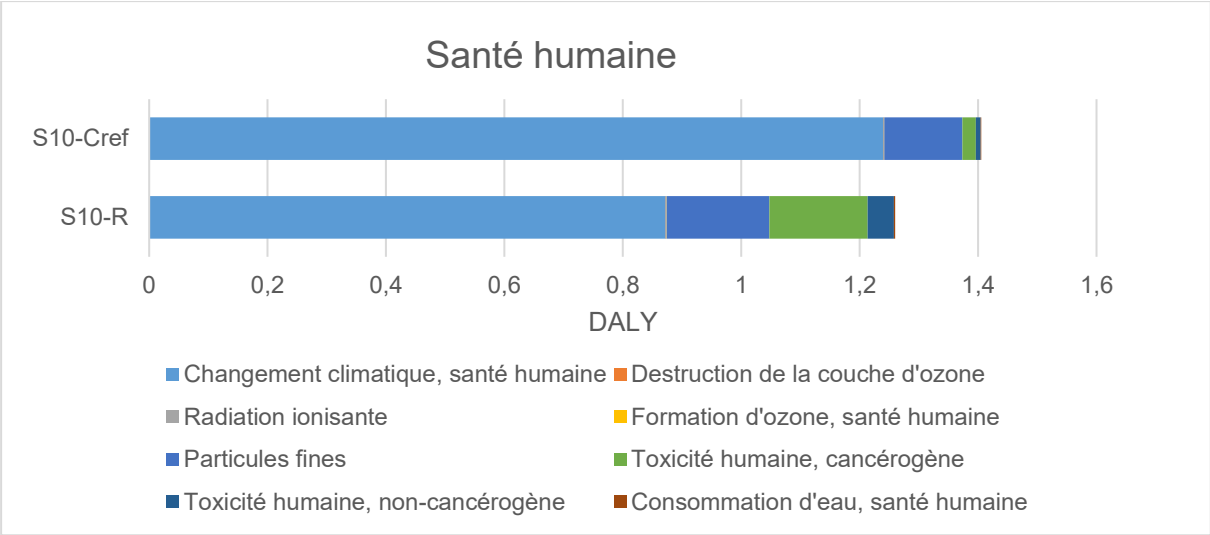


Figure 5-84 : Cas d'étude 10 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

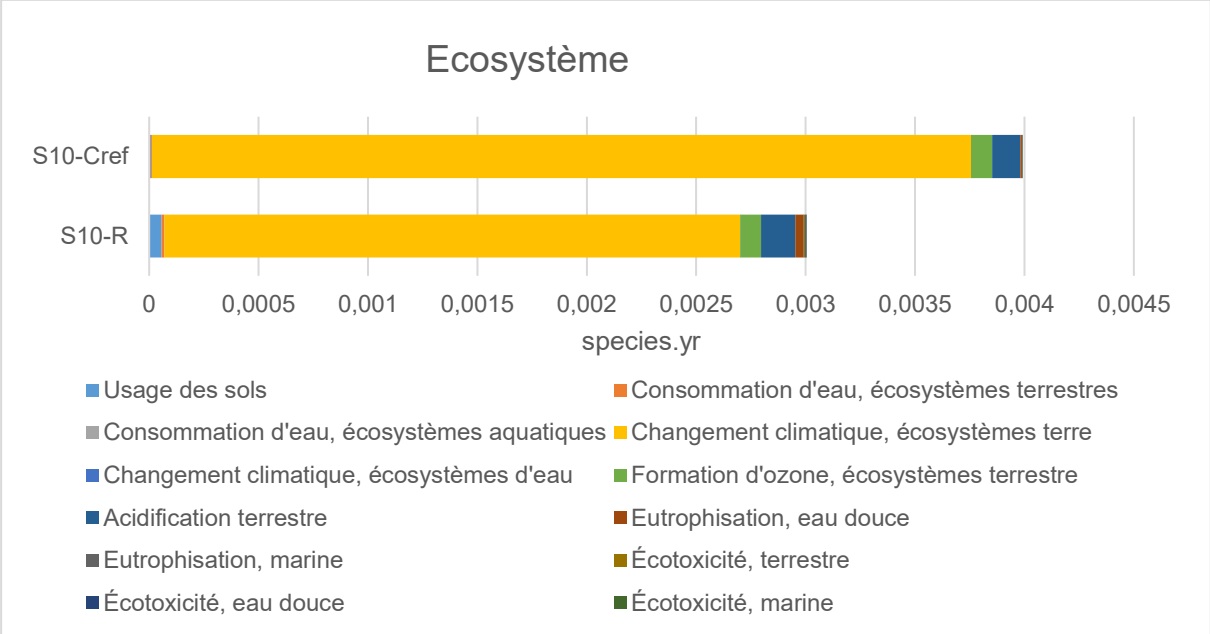


Figure 5-85 : Cas d'étude 10 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

Le système à base de capteurs solaire plans grande surface est le plus performant sur ces indicateurs au vu de sa bien moindre consommation de gaz naturel. Concernant les ressources naturelles, la conclusion est changée au vu de la consommation plus importante du scénario solaire en acier pour le stockage d'eau chaude et de la production des panneaux solaires.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Au vu de l'importance du complément gaz, une analyse de sensibilité est réalisée sur le taux de couverture solaire du scénario S10-R. U**ne analyse de sensibilité est aussi réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.
La forte contribution des infrastructures sur les scénarios solaires amène également à considérer une analyse de sensibilité sur les taux de recyclage des panneaux.

5.12 Cas d'étude 11

Rappel des configurations des scénarios :

- S11-RC : réseau de chaleur alimenté par des pompes à chaleur sur aquifère profond (Dogger);
- S11-Cref : réseau de chaleur alimenté par des chaudières gaz ;
- S11-Dref : chaudières gaz par bâtiment.

5.12.1 Résultats bruts sur les indicateurs midpoint

Le tableau ci-dessous fournit l'impact relatif de chacun des trois scénarios du cas d'étude 11 sur chacun des impacts midpoints considérés. Les résultats de chaque scénario sont exprimés en pourcentage par rapport au scénario le plus impact (qui n'est pas toujours le même). Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le système avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 5-54 : Cas d'étude 11 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint

Indicateurs d'impact midpoint	S11-RC	S11-Cref	S11-Dref
Changement climatique	15%	88%	100%
Destruction de la couche d'ozone	37%	96%	100%
Radiation ionisante, santé humaine	100%	15%	1%
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	37%	95%	100%
Particules fines	100%	61%	45%
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	100%	66%	47%
Toxicité humaine, effets cancérogènes	100%	67%	42%
Acidification terrestre et eau douce	77%	100%	91%
Eutrophisation, eau douce	100%	41%	30%
Eutrophisation, marine	60%	100%	89%
Eutrophisation, terrestre	82%	100%	86%
Ecotoxicité, eau douce	100%	62%	42%
Usage des sols	100%	41%	17%
Consommation d'eau	100%	24%	10%
Ressources énergétiques	60%	100%	100%
Ressources minérales et métalliques	100%	55%	51%

Ce premier tableau nous montre qu'aucun scénario n'apparaît clairement comme le meilleur ou le pire.

Le classement entre les scénarios centralisés et décentralisés dépend fortement de l'indicateur considéré. Les systèmes S11-RC et S11-Dref ont la particularité d'opposer leurs impacts, le scénario S11-Dref est le scénario le moins impactant sur 9 indicateurs, cependant il est le scénario le plus impactant sur les indicateurs de changement climatique et trois autres indicateurs supplémentaires.

Il est à ce stade difficile de départager les scénarios, notamment car les différents systèmes comparés ne possèdent pas la même hiérarchie sur chacun des indicateurs. Les analyses suivantes permettent de cibler les indicateurs sur lesquelles il sera nécessaire de se focaliser, ensuite l'analyse de contribution permettra de comprendre les principaux contributeurs afin de fournir une interprétation des résultats et des pistes d'améliorations.

5.12.2 Identification des indicateurs pertinents

Les figures ci-dessous fournissent l'impact relatif de chacun des trois scénarios du cas d'étude 11 sur chacun des impacts endpoint considérés.

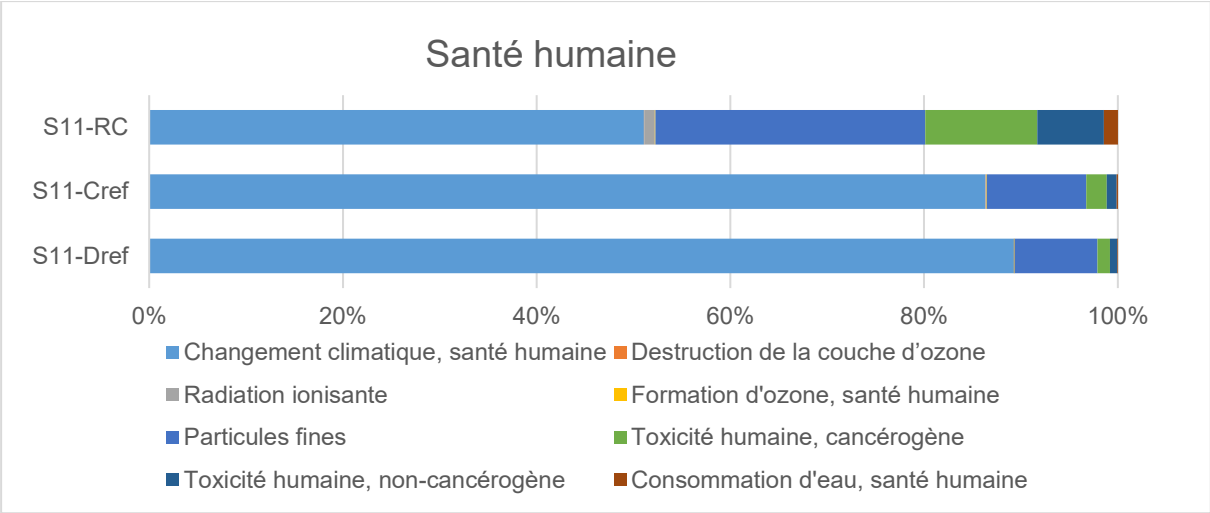


Figure 5-86 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages à la santé humaine

Les dommages causés à la santé humaine par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique et liés aux émissions de particules fines. Suivent dans un second ordre les impacts sur la toxicité humaine.

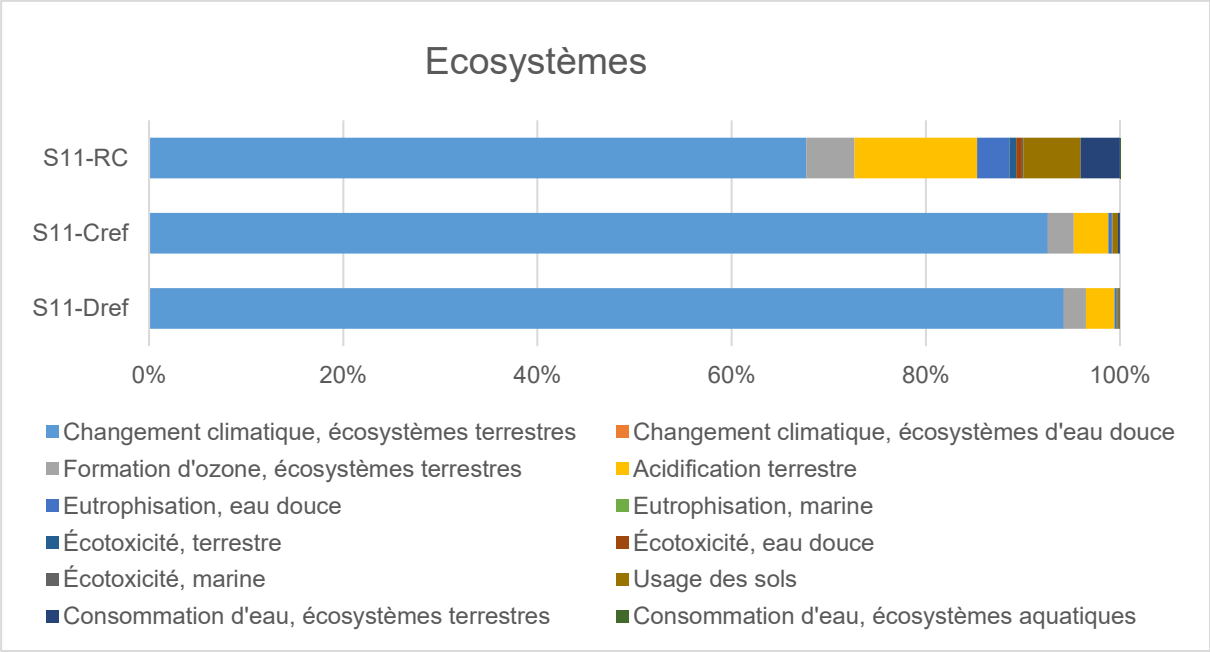


Figure 5-87 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages aux écosystèmes

Les dommages causés sur les écosystèmes par les scénarios proviennent en très grande majorité des impacts sur le changement climatique. Suivis dans un second ordre par l'indicateur d'acidification terrestre et dans une moindre mesure l'indicateur d'usage des sols.

En ce qui concerne le troisième domaine d'impact endpoint sur les ressources, deux indicateurs midpoints sont représentés : épuisement des ressources minérales/métalliques et épuisement des énergies fossiles. Même si l'indicateur de ressources énergétiques est largement prépondérant sur l'indicateur ressources minérales et métalliques (cf. cas d'étude 1), les deux indicateurs sont étudiés car tous les deux pertinents pour cette étude.

Cette première analyse des indicateurs endpoint démontre qu'il est pertinent pour ce cas d'étude 11 de s'intéresser plus précisément aux indicateurs suivants :

- Changement climatique ;

- Particules fines ;
- Epuisement des énergies fossiles ;
- Epuisement des ressources minérales et métalliques.

5.12.3 Analyse de contribution sur les indicateurs pertinents

Les étapes du cycle de vie les plus contributrices sont analysées, puis au sein de ces étapes les principaux processus contributeurs sont identifiés, et enfin une analyse poussée de ces différents procédés permet d'identifier les sous-processus ou les flux élémentaires responsables des plus grands impacts.

5.12.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 11 sur l'indicateur de changement climatique.

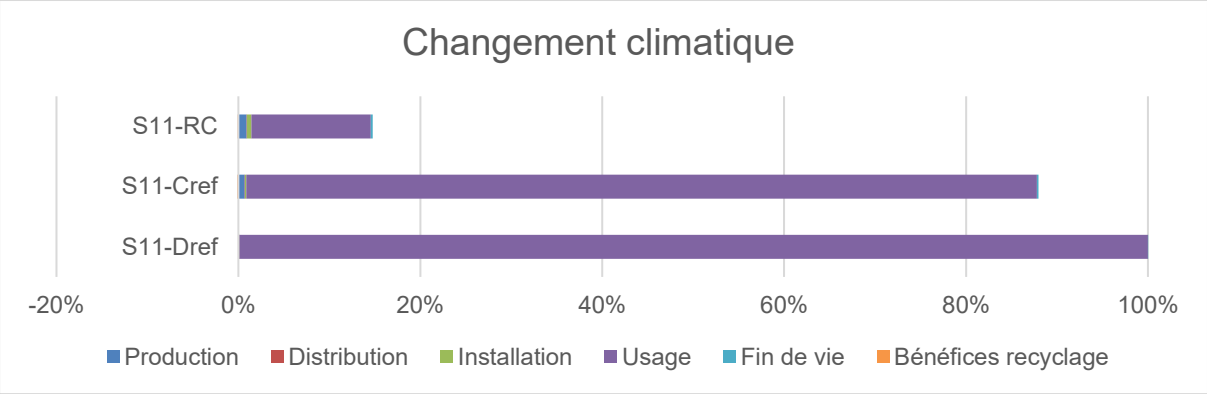


Figure 5-88 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario à base de PAC centralisés (S11-RC) est plus performant que les deux scénarios avec chaudières gaz ;
- La raison principale est une demande plus importante en gaz à l'usage pour les scénarios S11-Cref et S11-Dref ;

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 90 % des impacts pour chaque scénario ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80 % de l'impact.

Tableau 5-55 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique

S11 RC		**S11 Cref**		**S11 Dref**	
Emissions liées à la combustion de gaz naturel (appoint)	40%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	82%	Emissions liées à la combustion de gaz naturel	78%
Consommation d'électricité des PAC	25%				
Consommation d'électricité des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau	17%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	16%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	22%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts liés à la combustion de gaz sont causés par le CO_2 émis pendant le procédé ;
- Les impacts liés à la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, fuites de CH_4 …) ;
- Les impacts liés à la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales à charbon dans le mix électrique français.

Conclusion sur l'indicateur de changement climatique :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la quantité de gaz et d'électricité consommée. Les scénarios S11-Cref et S11-Dref composés de chaudières gaz sont les scénarios les plus émetteurs de CO_2 eq., causés par la combustion du gaz naturel, bien plus impactant sur le changement climatique que l'électricité française.

Les PAC centralisées ont donc une performance carbone supérieure à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts du système S11-RC viennent de l'appoint au gaz. Le recours au gaz doit être limité au maximum pour améliorer leur performance carbone, par exemple en augmentant la puissance de la PAC.

5.12.3.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 11 sur l'indicateur d'émission de particules fines.

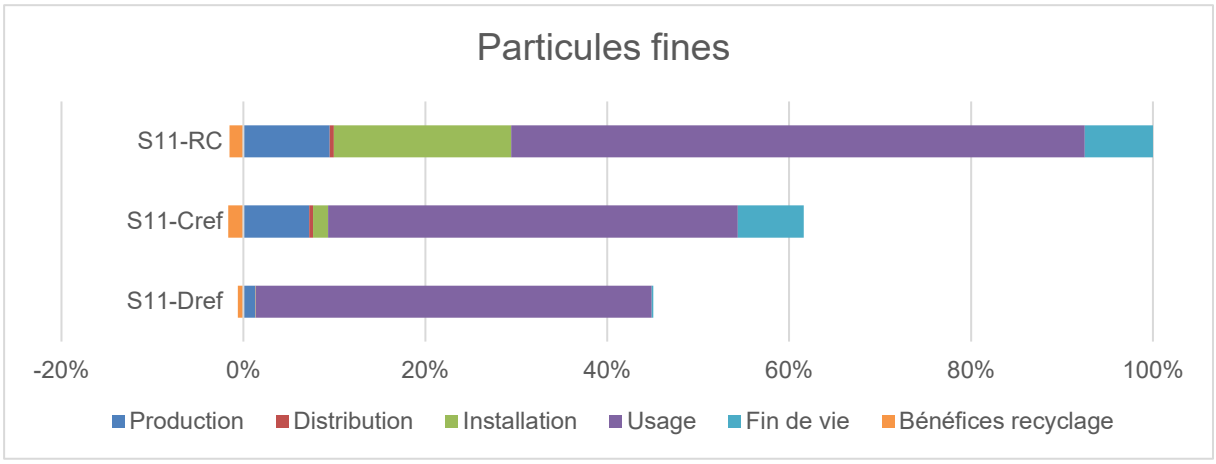


Figure 5-89 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario centralisé à base de PAC (S11-RC) est environ deux fois moins performant que les scénarios à base de chaudières gaz ;
- La raison principale est une demande plus importante d'électricité à l'usage pour le S11-RC.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable à elle seule de 63 à 73 % de l'impact des scénarios S11-RC et S11-Cref et jusqu'à 98% du scénario S11-Dref ;
- L'étape d'installation représente 20 % de l'impact du scénario S11-RC, principalement dû à la réalisation des forages ;
- L'étape de production représente 12 % de l'impact du scénario S11-Cref ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-56 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines

S11 RC		S11 Cref		S11 Dref	
Consommation électrique des PAC	33%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	43%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	74%
Consommation d'électricité des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau	20%	Emissions liées à la combustion de gaz	18%		
Phase de forage	18%	Génie civil : démantèlement (10%), production de l'acier (5%), production du béton (3%)	18%		
Génie civil : démantèlement (6%), production du béton (3%), production de l'acier (2%)	11%	Consommation électrique des pompes réseaux	17%	Emissions liées à la combustion de gaz	23%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation des centrales nucléaires (traitement des résidus d'uranium) et des centrales à biogaz dans le mix électrique français (digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz (extraction, transport, construction des pipelines, …) ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à la phase de démantèlement des matériaux, notamment lors de la combustion de carburant dans les machines ;
- Les impacts de la phase de forage sont principalement liés à la combustion de carburant dans les machines ;
- Les impacts de la combustion de gaz sont causés par l'émission de particules fines lors de la combustion.

Conclusion sur l'indicateur d'émission particules fines :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz. Le scénario S11-RC composé de PAC sur aquifère profond (Dogger) est le scénario le plus impactant, causé par une consommation plus importante d'électricité.

Les PAC centralisées ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts du système viennent de leur consommation électrique et des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton doivent être limitées au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.12.3.3 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 11 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques.

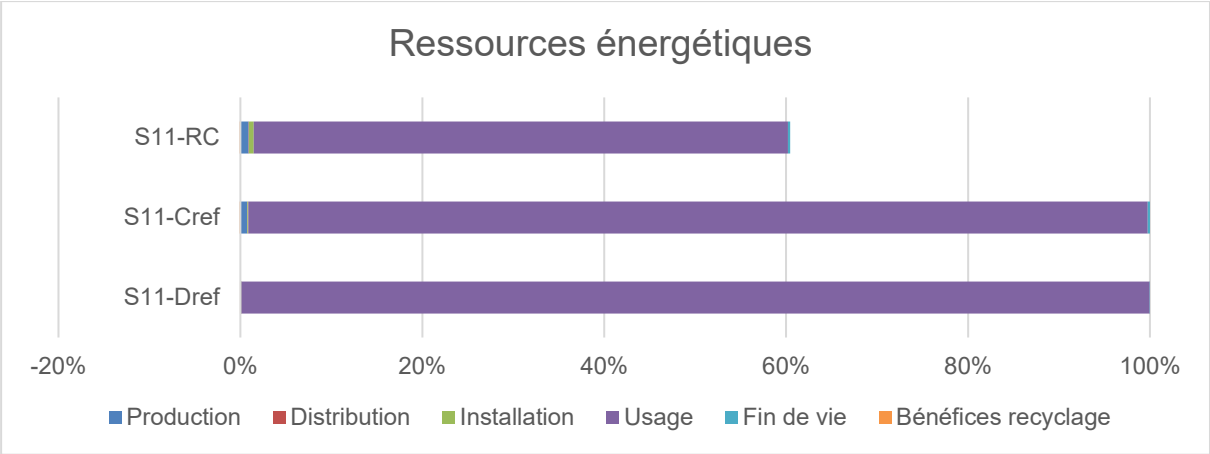


Figure 5-90 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario centralisé à base de PAC est environ 40 % plus performant que les scénarios avec chaudières gaz ;
- La raison principale est une demande plus importante d'énergie à l'usage pour les chaudières gaz.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape d'usage est responsable de plus de 97 % de l'impact sur l'ensemble des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-57 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques

S11 RC		S11 Cref		S11 Dref	
Consommation électrique des PAC	47%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	92%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	99%
Consommation d'électricité des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau	26%				
Emissions liées à la distribution du gaz en amont	12%				

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation d'uranium dans la production d'électricité nucléaire ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par l'utilisation de gaz naturel.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz. Le système S11-RC a un impact inférieur de 40 % par rapport aux autres solutions. On retrouve la même hiérarchie que sur l'indicateurs du changement climatique entre les solutions.

Les PAC centralisées ont donc une performance supérieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les PAC (qui pompent de la chaleur dans l'environnement) ont l'avantage d'avoir un COP élevé, mais fonctionnant à l'électricité, le bénéfice de ce COP est très réduit par le coefficient de conversion

de l'électricité en énergie primaire élevée également. Ce résultat dépend cependant beaucoup du mix électrique considéré. Une analyse de sensibilité est réalisée sur ce mix au § 6.12

5.12.3.4 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque étape du cycle de vie des différents scénarios du cas d'étude 11 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques.

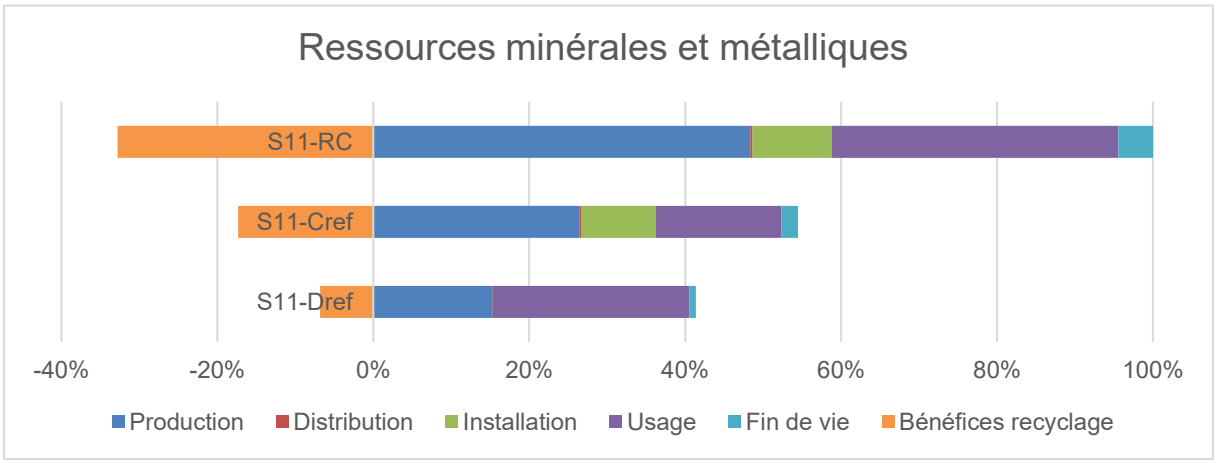


Figure 5-91 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

D'un point de vue comparatif, on peut faire les observations suivantes :

- Le scénario centralisé à base de PAC (S11-RC) est environ deux fois moins performant que le scénario à base de chaudières gaz ;
- La phase de production du S11-RC est supérieure ou équivalente à elle seule à l'impact du cycle de vie complet des deux autres scénarios ;
- Les solutions avec chaudières gaz sont les scénarios qui utilisent le moins de ressources.

D'un point de vue individuel, on peut faire les observations suivantes :

- L'étape de production est responsable de 37 % de l'impact du scénario S11-Dref et de 48 % pour les deux scénarios restants ;
- L'étape d'usage est responsable de 30 à 37 % de l'impact sur scénarios S11-RC et S11-Cref et jusqu'à 70% du scénario S11-Dref ;
- L'étape d'installation est responsable de 10 à 18 % de m'l'impact des scénarios S11-RC et S11-Cref ;
- Les bénéfices liés au recyclage, permettent d'éviter entre 17 et 33 % de l'impact des scénarios ;
- Les autres étapes, inférieurs à 10 %, sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV.

L'analyse de contribution présentée dans le tableau suivant permet de détecter les principaux procédés contribuant à l'impact des différents scénarios. Le tableau présente les principaux contributeurs des différents scénarios à hauteur de 80% de l'impact.

Tableau 5-58 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

S11 RC		S11 Cref		S11 Dref	
Consommation électrique des PAC	28%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	29%	Emissions liées à la distribution du gaz en amont	63%
Consommation d'électricité des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau	25%				
Construction du réseau de chaleur	14%	Construction du réseau de chaleur	26%		

S11 RC		S11 Cref		S11 Dref	
Génie civil - production du béton (3%), production de l'acier (4%)	8%	Consommation électrique des pompes réseaux	14%		
Production des PAC	6%	Génie civil - production de l'acier (8%), production du béton (5%),	14%	Production de la chaudière à condensation – production du cuivre et laiton	27%

L'analyse de ces différents procédés a permis de compléter le tableau précédent :

- Les impacts de la consommation électrique (PAC et pompes réseaux) sont causés principalement par l'utilisation de cuivre, plomb, zinc et argent dans les différentes étapes du procédé ;
- Les impacts de la production de gaz sont causés par la chaîne d'approvisionnement du gaz, principalement par la production d'acier et de cuivre utilisés dans les infrastructures ;
- Les impacts de la production de la chaudière pour le scénario S11-Dref sont causés par la production de cuivre et de laiton ;
- Les impacts de la production de la PAC pour le scénario S11-RC sont causés par la production de cuivre utilisé dans le condensateur ;
- Les impacts de la phase de génie civil sont principalement liés à la production du béton et de l'acier pour les infrastructures.

Conclusion sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques :

Les différentes analyses permettent de démontrer que les principales différences entre les scénarios proviennent de la consommation d'électricité et de gaz, du type de matériaux et de la quantité utilisée. Le scénario S11-RC composé de PAC aérothermique par bâtiment est le scénario le plus impactant, causé par une consommation importante d'électricité et une étape de production nécessitant un plus grand nombre de matériaux.

Les PAC centralisées ont donc une performance inférieure sur cet indicateur à celle des chaudières gaz. Les principaux impacts du système S11-RC1 vient de sa consommation électrique et des matériaux nécessaires à leur fabrication et leur mise en place. La consommation d'électricité et l'utilisation d'acier et de béton pour le scénario S11-RC doit être limité au maximum pour améliorer leur performance. Les impacts peuvent être réduits également en augmentant les taux de recyclage.

5.12.4 Conclusion intermédiaire sur le cas d'étude 11

Synthèse des résultats par indicateur

Pour le cas d'étude 11, la performance environnementale des systèmes a été comparée pour les 4 indicateurs responsables de la majorité des dommages causés à la santé humaine, aux écosystèmes et aux ressources naturelles. Les conclusions de ces comparaisons sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	Systèmes plus performants que les systèmes étudiés	Systèmes moins performants que les systèmes étudiés	Principale source de l'impact du système étudié S11-RC
Changement climatique	Aucun	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S11-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S11-Dref)	Emissions de CO_2 lors de la phase d'usage, dues à l'appoint au gaz naturel (40%) et consommation électrique des PAC (25%)

Indicateur	Systèmes plus performants que les systèmes étudiés	Systèmes moins performants que les systèmes étudiés	Principale source de l'impact du système étudié S11-RC
Particules fines	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S11-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S11-Dref)	Aucun	Consommation électrique des PAC (33%) et des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau (20%)
Ressources énergétiques	Aucun	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S11-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S11-Dref)	Consommation électrique des PAC (47%) et des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau (26%)
Ressources minérales et métalliques	Réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz (S11-Cref) Chaudières gaz par bâtiment (S11-Dref)	Aucun	Consommation électrique des PAC (28%) et des pompes d'exhaure, de réinjection et du réseau (25%)

Conclusions tous indicateurs confondus

En considérant uniquement les résultats par indicateur, il est difficile de déterminer quels sont les systèmes qui présentent les meilleures performances environnementales. Les conclusions qu'on peut en tirer dépendent donc fortement de l'importance que le décideur souhaite accorder à chaque indicateur. On peut cependant analyser les résultats obtenus sur les indicateurs endpoint, qui permettent d'évaluer les dommages causés par ces systèmes. Les modèles endpoint sont très incertains, et il faut des écarts significatifs pour pouvoir établir une hiérarchie. On se gardera donc de donner des conclusions trop tranchées.

D'après les résultats présentés au § 5.12.2, la majorité des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes causés par les systèmes comparés dans ce cas d'étude le sont via les impacts sur le changement climatique, comme le montre une nouvelle fois les deux graphiques suivants, cette fois dans leur unité respective.

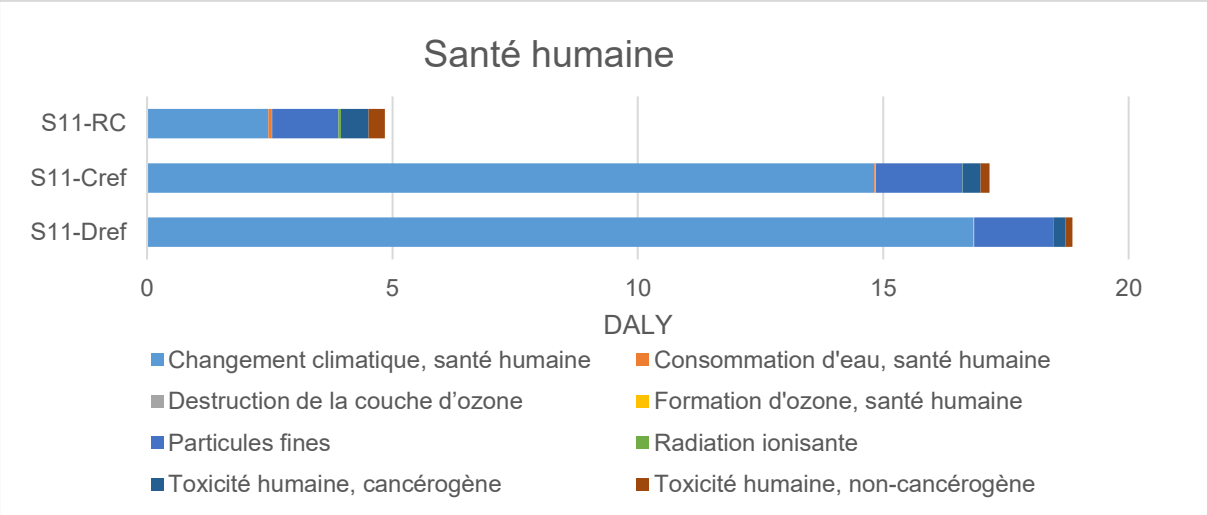


Figure 5-92 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative

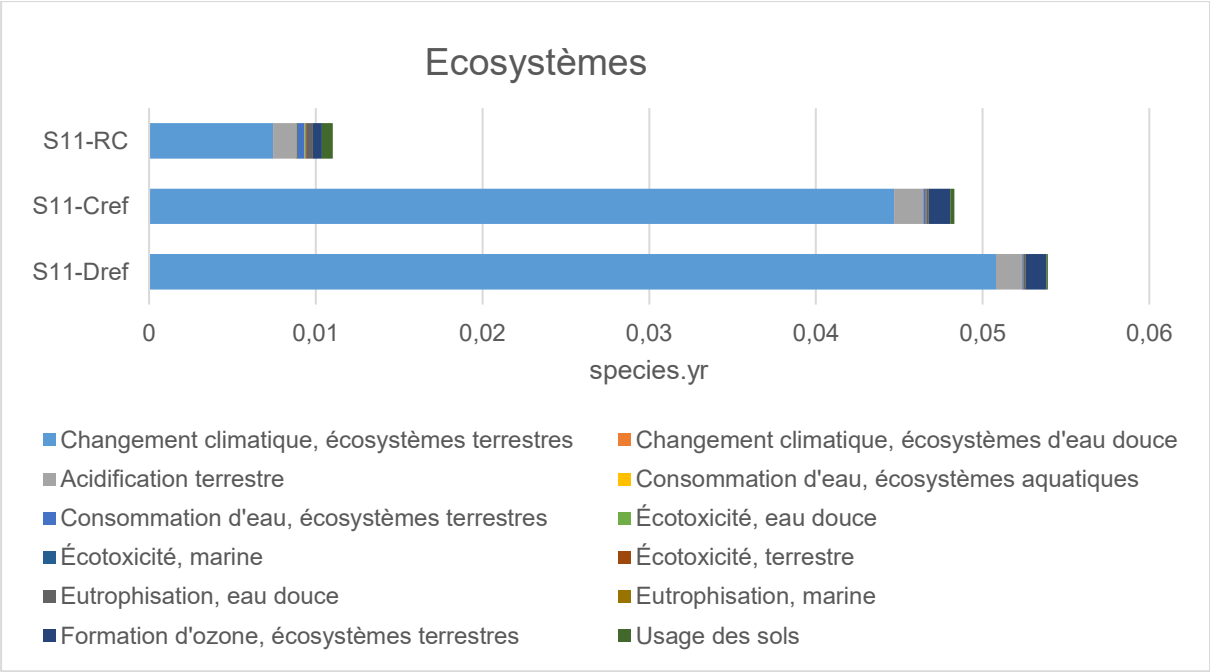


Figure 5-93 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative

Le système à base de PAC (S11-RC) est le plus performant sur le changement climatique, et bien qu'il soit moins performant sur les indicateurs de particules fines et de ressources minérales et métalliques, on peut considérer que ce système cause globalement moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que les systèmes à base de chaudières gaz (S11-Cref et S11-Dref). Concernant les ressources naturelles, les systèmes à base de chaudières contribuent davantage à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles (via l'utilisation de gaz naturel), là où le système à base de PAC contribue en France à l'épuisement des ressources en uranium et plus généralement à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Analyses de sensibilité à réaliser

Les conclusions présentées ci-dessus sont très dépendantes des hypothèses retenues pour la modélisation de ces systèmes. Des analyses de sensibilités sont réalisées pour vérifier que ces conclusions sont robustes.

Vu l'importance des impacts de la consommation électrique, **une analyse de sensibilité est réalisée sur le mix électrique** avec un Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian », pour valider cette conclusion.

Les groupes froids fonctionnent avec un réfrigérant à faible PRG (potentiel de réchauffement global) peu représentatif du stock actuel en fonctionnement, il serait intéressant de faire varier le type de réfrigérant sur un réfrigérant HFO (voué à disparaitre).

6 Analyses de sensibilité locales

6.1 Eléments communs à tous les cas d'étude

6.1.1 Principes et objectifs

Des analyses de sensibilité ont été menées pour tester différents scénarios sur des paramètres susceptibles d'orienter le résultat. Comme pour la partie précédente, les résultats sur tous les indicateurs sont présentés sous forme de tableau, mais seuls les indicateurs identifiés comme pertinents par l'analyse des résultats sur les indicateurs endpoint sont analysés en détail.

Pour chaque cas d'étude, les paramètres dont l'influence est analysée ont été déterminés en fonction des conclusions de l'analyse de contribution. Les paramètres analysés sont donc spécifiques à chacun. Cependant, plusieurs paramètres se retrouvent dans plusieurs cas d'étude. C'est notamment le cas du mix électrique choisi pour les équipements de chauffage comme présenté ci-dessous.

Les analyses de sensibilité permettent ainsi de vérifier la robustesse des conclusions de l'étude.

6.1.2 Hypothèses relatives aux mix électriques

Pour rappel, dans le modèle de référence dont les résultats sont présentés au § 4.1.2.2, le mix électrique correspond au mix annuel 2017 :

- Pour les cas d'étude de réseau urbain, la demande électrique varie fortement : un outil a été utilisé pour calculer un mix électrique spécifique, prenant en compte la consommation à chaque heure.
- Pour les cas d'étude industriels, la demande étant plus constante, le mix électrique annuel moyen pour l'année 2017 a été utilisé.

Etant donnée la contribution très importante de l'électricité aux résultats de la plupart des indicateurs, une analyse de sensibilité a été réalisée, avec :

- Le mix par usage « chauffage » du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs [53] ;
- Le mix par usage « climatisation » issue du mix industrie du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs [53] ;
- Le mix « Visions ADEME » prospectif à 2050 [54].

Ces mix sont présentés plus en détail dans les parties suivantes. Une comparaison des impacts par kWh d'électricité consommé est présentée à l'Annexe 2.

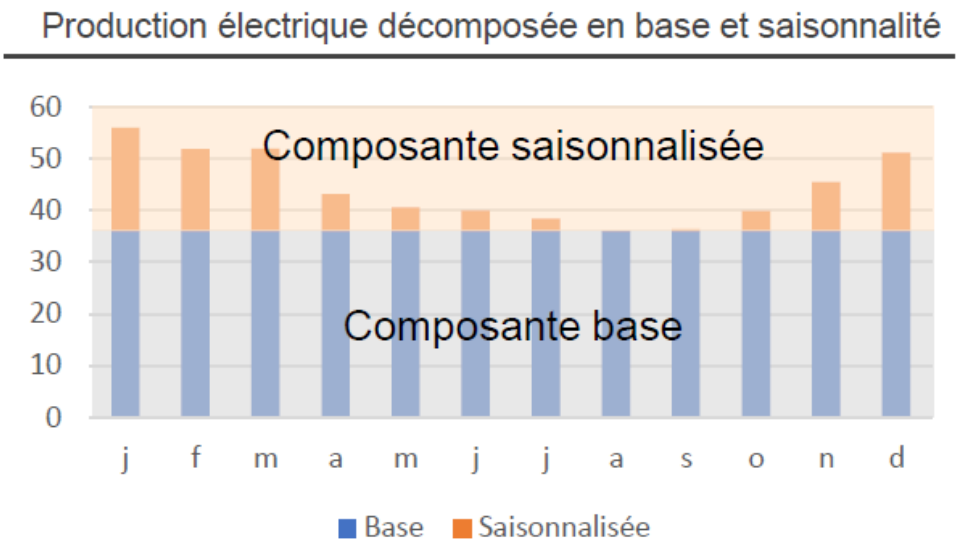
6.1.2.1 Les mix par usage

Pour chaque type de technologie, la production est séparée en deux composantes :

- une composante base constante sur l'année ;
- une composante saisonnalisée qui varie suivant la saison.

Cette méthode permet :

- d'affecter les émissions de CO_2 aux usages qui les provoquent ;
- de prendre en compte l'ensemble des moyens de flexibilité utilisés pour répondre aux enjeux de saisonnalité.



La donnée environnementale pour le mix par usage a été reconstituée dans SimaPro à partir des hypothèses à disposition du CRIGEN. Le mix par usage de production de la Base Carbone est présenté ci-dessous. Afin de faciliter la modélisation, les imports et exports sont modélisés ensuite dans ce mix comme ils le sont à hauteur nationale. L'empreinte carbone obtenue avec le mix par usage reconstitué est de 208 g CO_2 eq./kWh, contre 210 g CO_2 eq./kWh dans l'annexe 3 du référentiel Energie – Carbone [53]. Cette différence de moins de 1 % peut s'expliquer par l'utilisation des données ecoinvent 3.5 dans le cadre de la donnée reconstituée, alors que la base de données utilisées pour la valeur présentée dans le référentiel Energie – Carbone n'est pas précisée.

Pour les cas d'étude de chauffage urbain, la demande de chaleur couvre à la fois des usages de chauffage et d'ECS. Ces demandes n'ont pas été différenciées. Dans la Base Carbone, le mix par usage chauffage a un facteur d'émission plus élevé que le mix par usage ECS (83 g CO_2 eq./kWh). Dans une optique conservatrice, le besoin de chaleur est entièrement modélisé en sensibilité par un mix Usage « chauffage » à 208 g CO_2 eq./kWh.

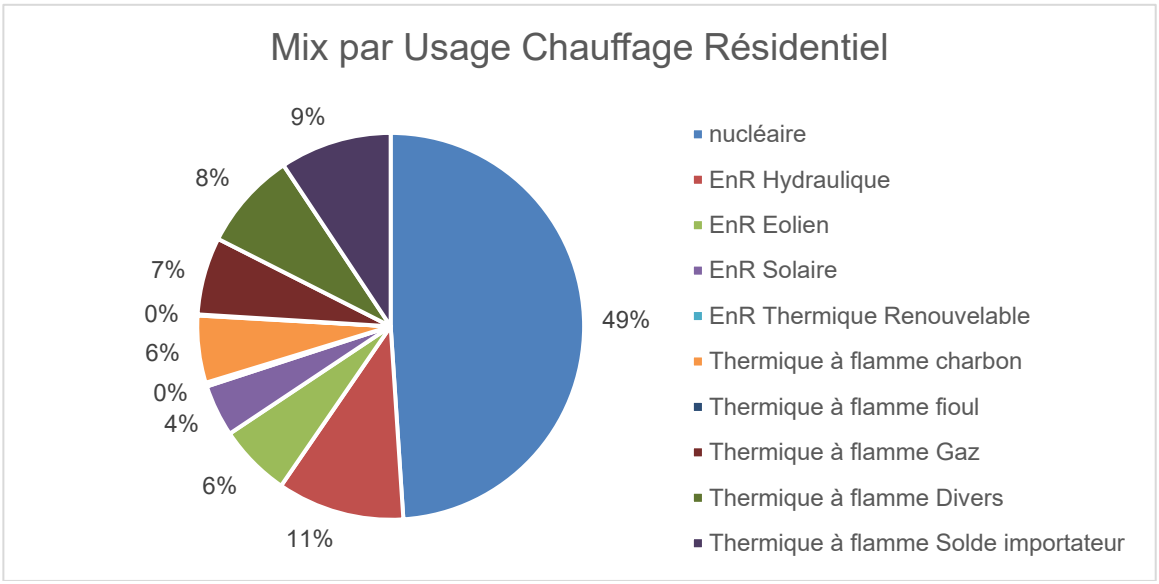


Figure 6-1 : Répartition de la production entre les filières pour le mix par usage chauffage résidentiel

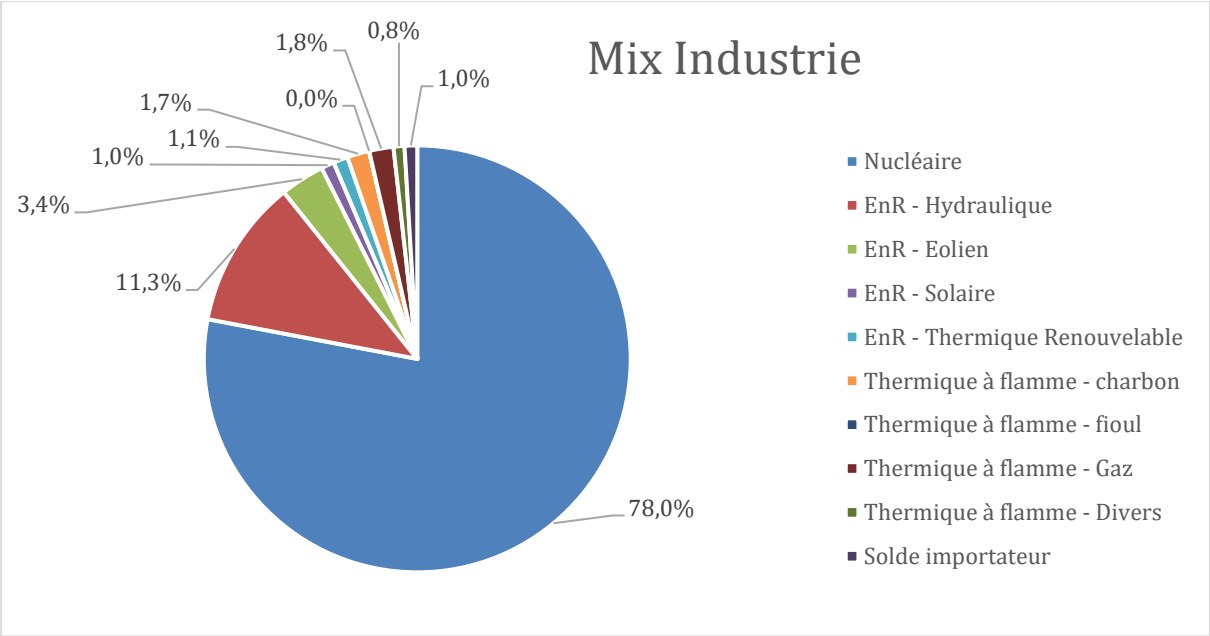


Figure 6-2 : Répartition de la production entre les filières pour le mix par usage Industrie utilisé également pour l'usage climatisation

Le mix par usage Industrie est également le mix utilisé pour la climatisation dans les analyses de sensibilité. Il s'agit d'un mix très peu carboné, la composante saisonnalisée ne faisant pas (ou peu) intervenir les centrales de dernier rang (par merit order) donc peu de charbon ou de gaz.

Le mix par usage est utilisé uniquement pour la consommation électrique des systèmes de production de chaleur et de froid. Pour les autres consommations électriques, le mix moyen annuel est conservé. En particulier, pour les réseaux urbains, l'électricité qui alimente les pompes est modélisée avec le mix moyen annuel.

6.1.2.2 Le mix Visions ADEME 2050

L'ADEME a réalisé plusieurs études prospectives qui ont amené à proposer des mix électriques à l'horizon 2050. Nous proposons d'utiliser l'un des mix fournis dans les visions ADEME 2030-2050 [54] où la part de chacune des filières est précisée pour 3 scénarios (Nucléaire Haut, Nucléaire Médian et Nucléaire Bas).

Dans la modélisation, la part « Energies marines » a été approximée par de l'éolien offshore. Nous choisissons le mix du scénario Nucléaire Médian présenté ci-dessous :

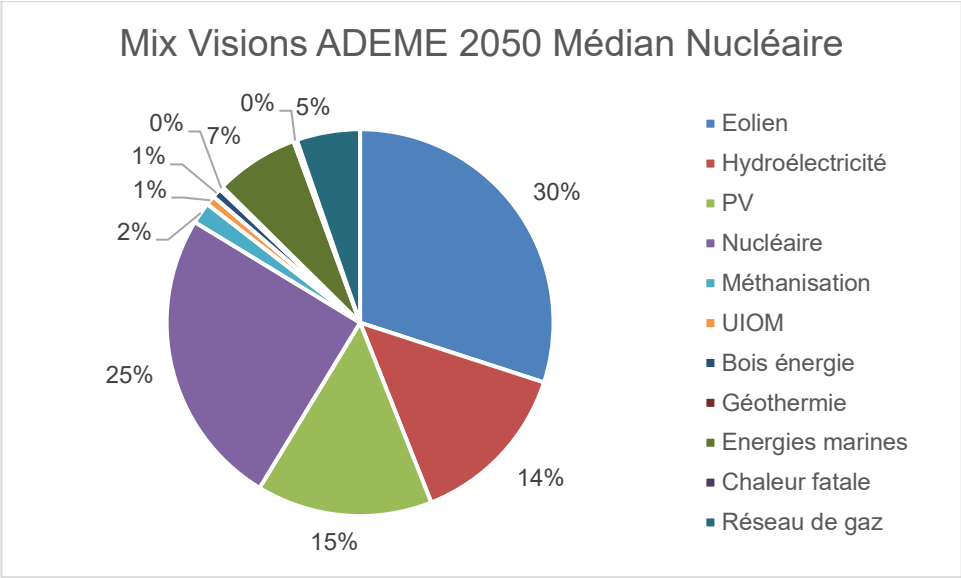


Figure 6-3 : Répartition de la production entre les filières pour le mix ADEME 2050

Le mix ADEME est utilisé à la fois pour la consommation d'électricité des systèmes de production de chaleur et de froid, et pour la consommation électrique des pompes pour les systèmes qui utilisent des réseaux urbains. Les autres consommations électriques (e.g. consommation à la fabrication des matériaux) ne sont pas modifiées par l'analyse de sensibilité.

Le mix ADEME Visions 2050 est légèrement plus carboné que le mix par usage Industrie, au vu des 5% de gaz naturel intervenant.

6.2 Cas d'étude 1

Pour le cas d'étude 1, les analyses de sensibilités suivantes ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- La température de l'eau approvisionnée ;
- Prise en compte de la conductivité du sol pour deux cas extrêmes : moitié moindre et double. La profondeur des sondes est directement liée à la conductivité du sol, et supposée de manière linéaire. L'installation, la production des sondes ainsi que la quantité de glycol ont donc été modélisés en conséquence ;
- Pour les scénarios à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2), la nature du réfrigérant est changée.

6.2.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 1 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-1 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S1-RC1			S1-RC2			S1-Cref			S1-Dref1			S1-Dref2		
		Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,10E+06	1,35E+06	9,19E+05	8,60E+05	1,06E+06	7,25E+05	2,78E+06	2,78E+06	2,77E+06	3,11E+06	3,11E+06	3,11E+06	6,14E+05	1,03E+06	3,46E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,34E-01	3,19E-01	2,21E-01	2,57E-01	2,50E-01	1,71E-01	4,80E-01	4,80E-01	4,71E-01	4,94E-01	4,94E-01	4,94E-01	1,08E+00	1,06E+00	9,32E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,90E+06	1,45E+06	6,84E+05	1,47E+06	1,16E+06	5,43E+05	1,64E+05	1,64E+05	6,32E+04	6,15E+03	6,15E+03	6,15E+03	2,39E+06	1,68E+06	8,72E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,98E+03	2,61E+03	1,62E+03	1,44E+03	1,96E+03	1,17E+03	2,27E+03	2,27E+03	2,25E+03	2,39E+03	2,39E+03	2,39E+03	1,46E+03	2,53E+03	9,30E+02
Particules fines	disease inc.	3,20E-02	2,75E-02	4,60E-02	2,37E-02	2,07E-02	3,55E-02	9,84E-03	9,84E-03	1,11E-02	8,00E-03	8,00E-03	8,00E-03	3,05E-02	2,30E-02	4,88E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	9,05E-02	1,06E-01	9,38E-02	7,61E-02	8,91E-02	7,96E-02	2,99E-02	2,99E-02	3,04E-02	2,21E-02	2,21E-02	2,21E-02	1,04E-01	1,34E-01	1,10E-01
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,71E-02	1,75E-02	1,97E-02	1,64E-02	1,68E-02	1,86E-02	6,84E-03	6,84E-03	7,07E-03	4,64E-03	4,64E-03	4,64E-03	1,79E-02	1,88E-02	2,14E-02
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,89E+03	4,61E+03	5,61E+03	2,88E+03	3,52E+03	4,33E+03	2,27E+03	2,27E+03	2,43E+03	2,05E+03	2,05E+03	2,05E+03	4,22E+03	5,46E+03	6,36E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,07E+02	2,57E+02	1,44E+02	1,55E+02	1,97E+02	1,07E+02	4,07E+01	4,07E+01	3,64E+01	2,85E+01	2,85E+01	2,85E+01	3,12E+02	4,01E+02	2,26E+02
Eutrophisation, marine	kg N eq	7,95E+02	9,55E+02	6,54E+02	5,76E+02	7,14E+02	4,75E+02	6,23E+02	6,23E+02	6,14E+02	5,58E+02	5,58E+02	5,58E+02	7,33E+02	1,01E+03	5,33E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,13E+04	1,01E+04	2,13E+04	8,46E+03	7,71E+03	1,67E+04	7,01E+03	7,01E+03	7,89E+03	6,07E+03	6,07E+03	6,07E+03	1,11E+04	9,07E+03	2,40E+04
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,85E+05	4,06E+05	3,93E+05	3,32E+05	3,53E+05	3,43E+05	1,28E+05	1,28E+05	1,30E+05	9,44E+04	9,44E+04	9,44E+04	4,60E+05	4,98E+05	4,70E+05
Usage des sols	Pt	6,91E+06	4,34E+06	9,76E+06	5,42E+06	3,51E+06	7,83E+06	1,09E+06	1,09E+06	1,35E+06	5,78E+05	5,78E+05	5,78E+05	6,04E+06	2,61E+06	1,07E+07
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,96E+05	4,40E+05	2,87E+05	3,52E+05	3,18E+05	1,95E+05	5,83E+04	5,83E+04	4,15E+04	2,35E+04	2,35E+04	2,35E+04	5,56E+05	4,72E+05	2,94E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	5,34E+07	4,76E+07	2,67E+07	4,12E+07	3,78E+07	2,10E+07	4,52E+07	4,52E+07	4,31E+07	4,43E+07	4,43E+07	4,43E+07	5,53E+07	4,66E+07	2,15E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	1,50E+00	1,71E+00	3,21E+00	1,22E+00	1,40E+00	2,60E+00	4,53E-01	4,53E-01	5,94E-01	4,49E-01	4,49E-01	4,49E-01	3,83E+00	4,25E+00	6,12E+00

6.2.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

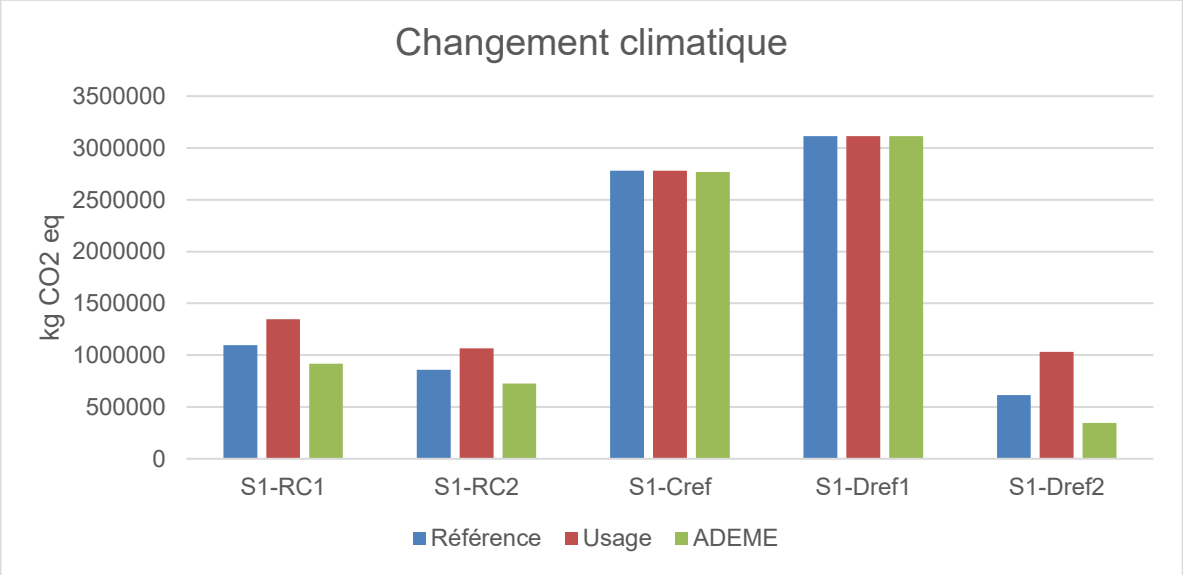


Figure 6-4 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur les scénarios PAC utilisant le plus d'électricité (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2), avec une multiplication par 1,7 de l'impact du scénario Dref2 lors de la modélisation avec le mix Usage ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence, et confirme avec le mix usage l'équivalence des impacts des système S1-Dref2 et S1-RC2.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.2.1.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

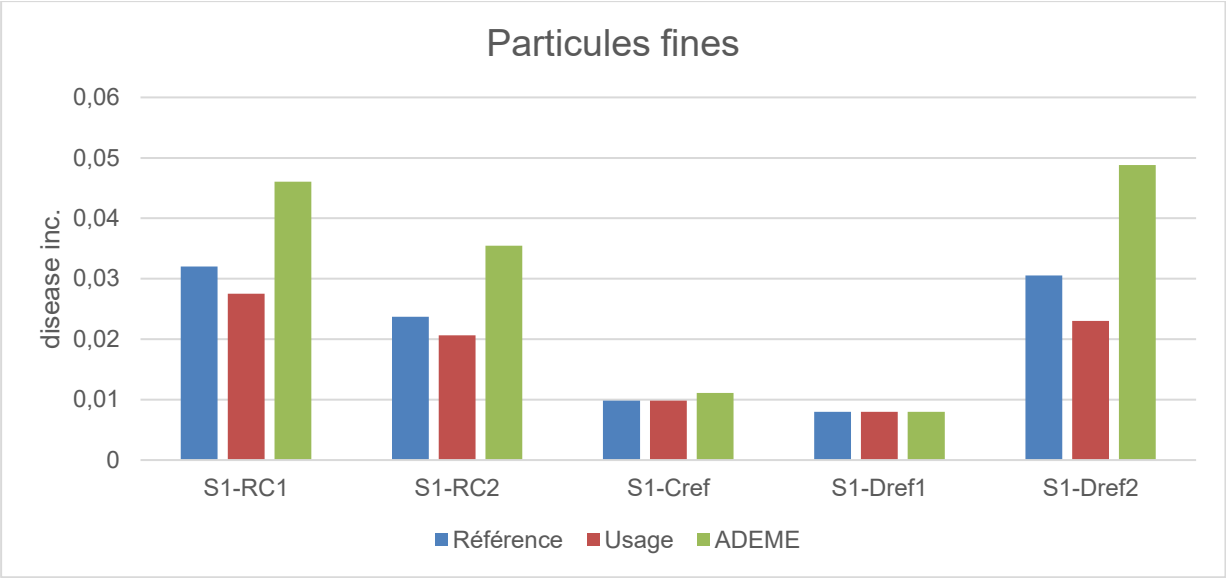


Figure 6-5 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur les scénarios PAC avec un impact augmenté de 1.5 à 2 fois lors de la modélisation avec le mix ADEME sur les scénarios utilisant le plus d'électricité (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2). Ceci s'explique par l'utilisation de manière plus importante des centrales à biogaz dans le mix électrique ADEME (impact de la digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;

À noter que cette analyse ne concerne que le mix électrique et non le mix gaz. Les impacts de la chaudière gaz dépendent aussi du type de gaz utilisé (par ex : biogaz), l'influence du mix gaz n'est pas étudiée ici.

Cette analyse ne remet pas en cause les conclusions sur le classement des différents systèmes, les systèmes à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) ont globalement des impacts similaires sur les particules fines.

6.2.1.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

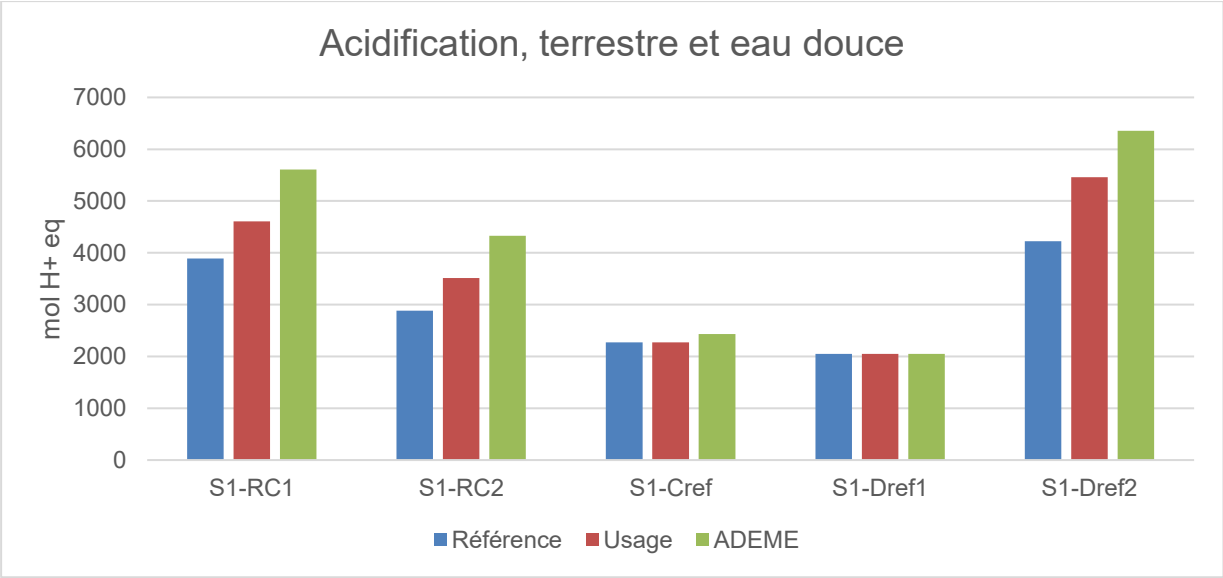


Figure 6-6 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur les scénarios PAC avec un impact augmenté de 1.5 fois lors de la modélisation avec le mix ADEME sur les scénarios utilisant le plus d'électricité (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2). Ceci s'explique par l'utilisation de manière plus importante des centrales à biogaz dans le mix électrique ADEME (impact de la digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe en dessous des mix Usage et ADEME ;

Les conclusions affirmées restent globalement les mêmes, le classement entre PAC et chaudières est identique.

6.2.1.4 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

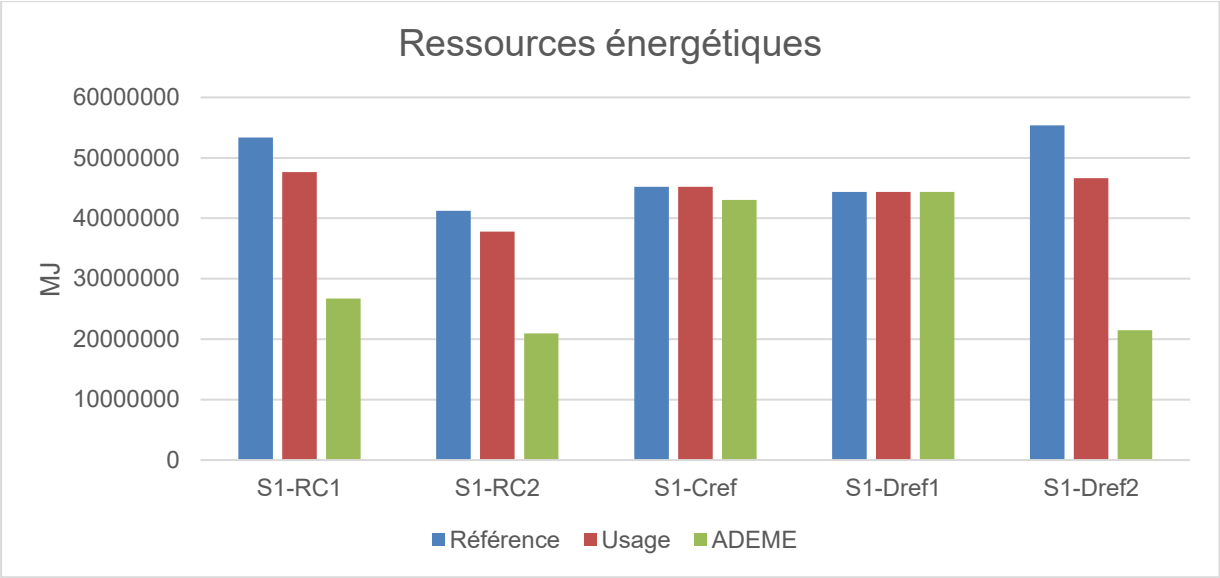


Figure 6-7 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur les scénarios PAC utilisant le plus d'électricité (S1-RC1, S1-RC2, S1-Dref2), avec un impact diminué de 2 à 3 fois lors de modélisation avec le mix ADEME ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe au-dessus des impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est différent avec l'utilisation du mix ADEME avec une amélioration de la performance des solutions PAC.

Les conclusions affirmées restent exactes avec la modélisation du mix Usage, mais ne le sont plus sur la modélisation avec le mix ADEME. Ce point est pris en en compte dans les conclusions de l'étude.

6.2.1.5 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

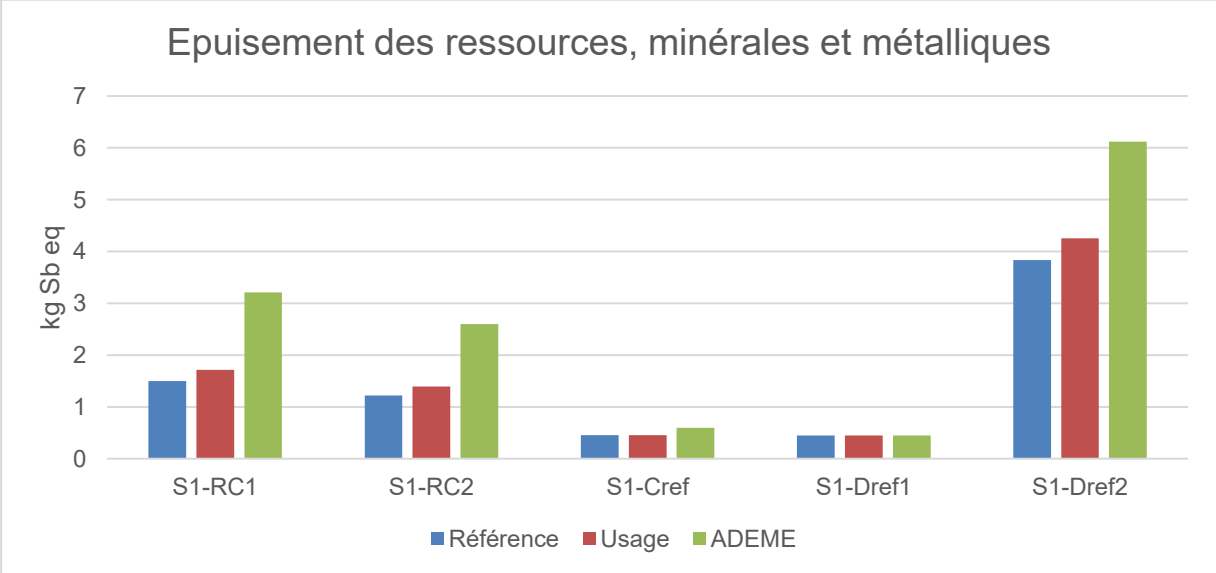


Figure 6-8 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur les scénarios PAC utilisant le plus d'électricité (S1-RC1, S1-RC2, S1-Dref2), avec un impact augmenté de 1.6 à 2 fois sur les scénarios PAC centralisées S1-RC1 et S1-RC2 lors de modélisation avec le mix ADEME ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe en dessous des impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

L'évolution de l'impact sur les scénarios utilisant le plus d'électricité est lié à l'épuisement des ressources induit par l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Les conclusions affirmées restent exactes, l'écart entre les scénarios PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) est encore plus important lorsque l'on modélise avec le mix ADEME.

6.2.2 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau dans le circuit secondaire de chaque bâtiment : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle 50/40°C. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 10°C :

- Scénario + 10°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 60°C / 50°C. Ce régime de température est couramment utilisé pour des bâtiments anciens avec une mauvaise isolation ;
- Scénario – 10°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 40°C / 30°C. Ce régime de température peut uniquement être utilisé pour des bâtiments neufs avec radiateurs basse température ou planchers chauffants.

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant uniquement la température de consigne. Selon la performance thermique d'un bâtiment, sa courbe de demande de chaleur n'est pas la même (par exemple, les bâtiments les mieux isolés ont des besoins de chaleur qui sont plus concentrés sur les périodes les plus froides). Cette analyse de sensibilité est donc une approche simplifiée. Les consommations énergétiques obtenues sont les suivantes :

		Référence	+10°C	-10°C
Consommation de gaz (kWh)	RC1	2 172 415	2 192 180	2 117 987
	RC2	1 854 930	1 881 686	1 818 001
	Cref	10 853 991	11 010 551	10 637 903
	Dref1	11 458 298	11 458 300	10 733 300
	Dref2	-	-	-
Consommation d'électricité des PAC (kWh)	RC1	2 729 868	3 205 996	2 266 736
	RC2	2 160 472	2 626 027	1 695 785
	Cref	-	-	-
	Dref1	-	-	-
	Dref2	4 479 312	6331900	3 319 750
COP	RC1	3,1	2,7	3,8
	RC2	4,1	3,4	5,2
	Cref	-	-	-
	Dref1	-	-	-
	Dref2	2,3	1,6	3,1

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 1 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-2 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S1-RC1			S1-RC2			S1-Cref			S1-Dref1			S1-Dref2		
		Réf.	+10 °C	-10°C	Réf.	+10 °C	-10°C	Réf.	+10 °C	-10°C	Réf.	+10 °C	-10°C	Réf.	+10 °C	-10°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,10E+06	1,16E+06	1,03E+06	8,58E+05	9,17E+05	7,96E+05	2,78E+06	2,82E+06	2,73E+06	3,11E+06	3,11E+06	2,92E+06	6,14E+05	8,53E+05	4,64E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,38E-01	3,64E-01	3,11E-01	2,61E-01	2,86E-01	2,35E-01	4,80E-01	4,87E-01	4,71E-01	4,94E-01	4,94E-01	4,63E-01	1,08E+00	1,18E+00	1,01E+00
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,90E+06	2,15E+06	1,66E+06	1,47E+06	1,70E+06	1,24E+06	1,64E+05	1,64E+05	1,64E+05	6,15E+03	6,15E+03	5,79E+03	2,39E+06	3,37E+06	1,77E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,98E+03	2,11E+03	1,85E+03	1,43E+03	1,55E+03	1,31E+03	2,27E+03	2,30E+03	2,23E+03	2,39E+03	2,39E+03	2,24E+03	1,46E+03	2,02E+03	1,11E+03
Particules fines	disease inc.	3,20E-02	3,47E-02	2,93E-02	2,36E-02	2,61E-02	2,10E-02	9,83E-03	9,93E-03	9,70E-03	8,00E-03	8,00E-03	7,51E-03	3,05E-02	4,23E-02	2,32E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	9,07E-02	9,63E-02	8,53E-02	7,67E-02	8,19E-02	7,14E-02	3,00E-02	3,02E-02	2,97E-02	2,21E-02	2,21E-02	2,09E-02	1,04E-01	1,35E-01	8,52E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,68E-02	1,75E-02	1,60E-02	1,56E-02	1,63E-02	1,49E-02	6,79E-03	6,84E-03	6,73E-03	4,64E-03	4,64E-03	4,38E-03	1,79E-02	2,49E-02	1,36E-02
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,89E+03	4,26E+03	3,52E+03	2,87E+03	3,22E+03	2,52E+03	2,27E+03	2,30E+03	2,23E+03	2,05E+03	2,05E+03	1,92E+03	4,22E+03	5,87E+03	3,19E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,06E+02	2,25E+02	1,87E+02	1,49E+02	1,67E+02	1,31E+02	4,04E+01	4,06E+01	4,01E+01	2,85E+01	2,85E+01	2,69E+01	3,12E+02	4,17E+02	2,47E+02
Eutrophisation, marine	kg N eq	7,94E+02	8,57E+02	7,32E+02	5,74E+02	6,33E+02	5,14E+02	6,23E+02	6,31E+02	6,12E+02	5,58E+02	5,58E+02	5,23E+02	7,33E+02	9,99E+02	5,66E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,13E+04	1,24E+04	1,03E+04	8,44E+03	9,44E+03	7,43E+03	7,01E+03	7,09E+03	6,89E+03	6,07E+03	6,07E+03	5,69E+03	1,11E+04	1,55E+04	8,33E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,81E+05	4,05E+05	3,58E+05	3,23E+05	3,46E+05	3,01E+05	1,28E+05	1,29E+05	1,27E+05	9,44E+04	9,44E+04	8,91E+04	4,60E+05	6,22E+05	3,58E+05
Usage des sols	Pt	6,90E+06	7,57E+06	6,26E+06	5,40E+06	6,03E+06	4,78E+06	1,09E+06	1,10E+06	1,09E+06	5,78E+05	5,78E+05	5,43E+05	6,04E+06	8,44E+06	4,54E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,96E+05	5,52E+05	4,42E+05	3,51E+05	4,03E+05	2,99E+05	5,83E+04	5,86E+04	5,80E+04	2,35E+04	2,35E+04	2,21E+04	5,56E+05	7,81E+05	4,15E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	5,34E+07	5,91E+07	4,77E+07	4,12E+07	4,66E+07	3,58E+07	4,52E+07	4,58E+07	4,44E+07	4,43E+07	4,43E+07	4,15E+07	5,53E+07	7,81E+07	4,11E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	1,46E+00	1,56E+00	1,37E+00	1,12E+00	1,21E+00	1,02E+00	4,47E-01	4,49E-01	4,44E-01	4,49E-01	4,49E-01	4,32E-01	3,83E+00	4,88E+00	3,18E+00

6.2.2.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau.

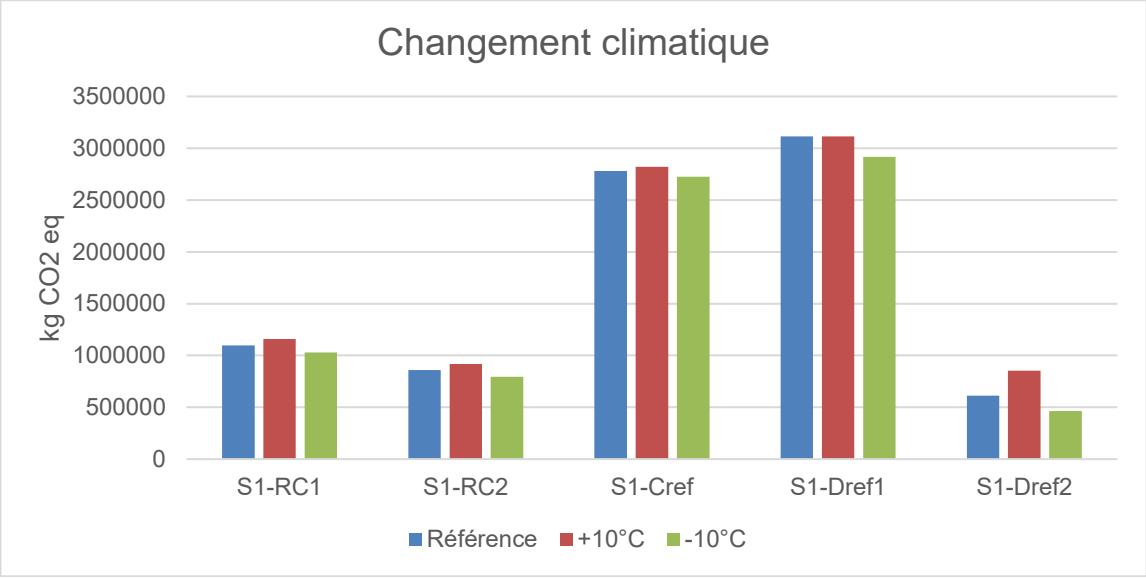


Figure 6-9 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.2.2.2 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau.

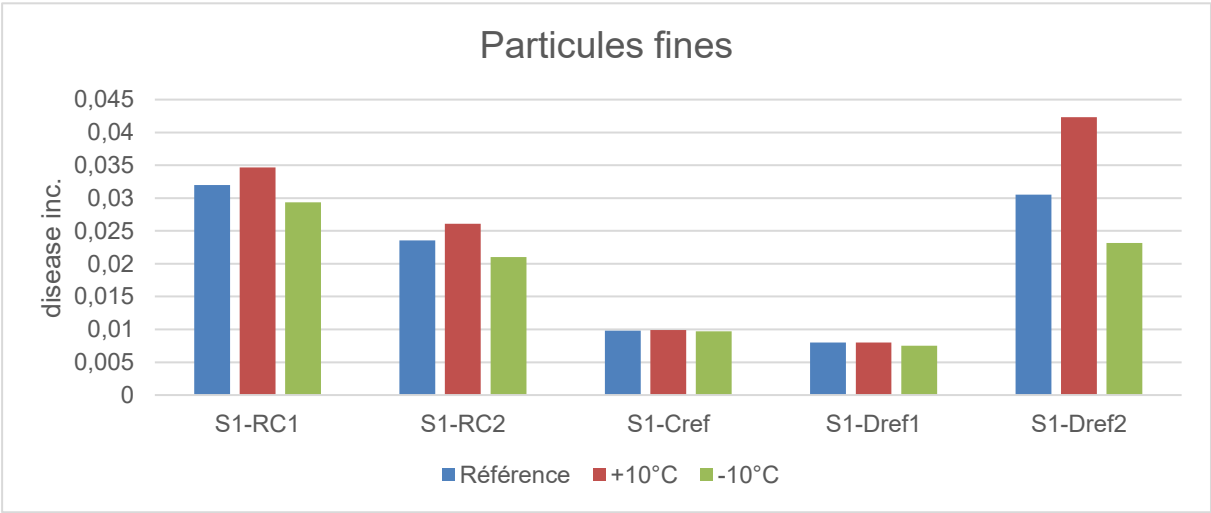


Figure 6-10 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur le scénario S1-Dref2 de 20 % sur l'augmentation de la température et de 10 % sur la baisse de la température ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le scénario S1-Dref2 devient le scénario le plus impactant lors de l'augmentation de la température et moins impactant que S1-RC1 lors de la diminution de température.

Les conclusions générales affirmées restent exactes. La principale évolution est le scénario S1-Dref2 qui n'est plus équivalent au S1-RC1 lors de l'évolution de la température mais le scénario le plus impactant.

6.2.2.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau.

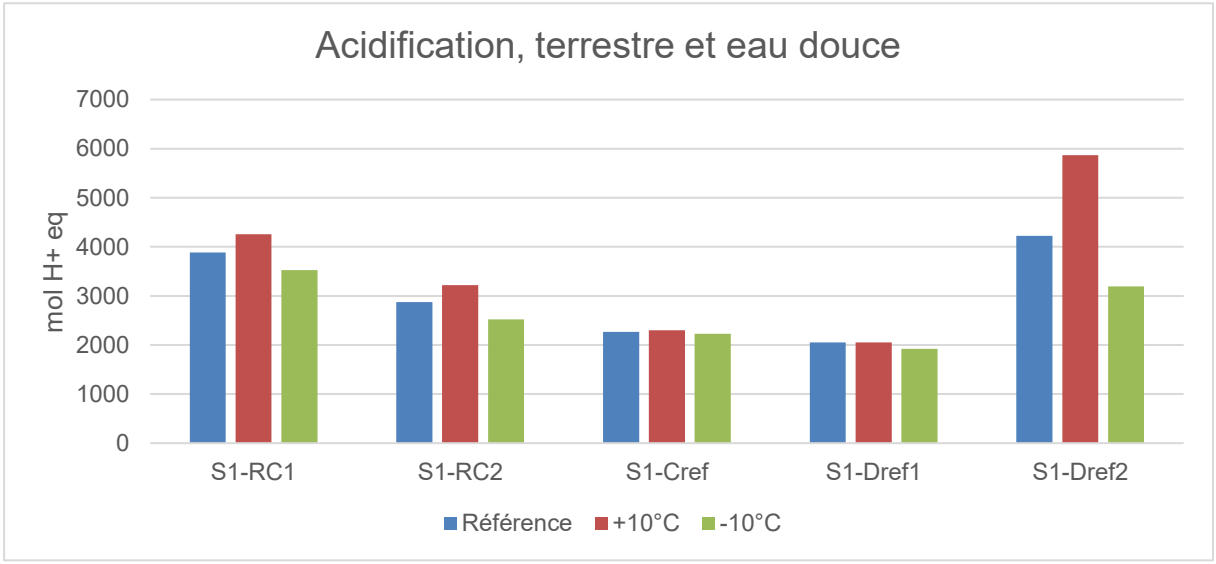


Figure 6-11 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur le scénario S1-Dref2 de 40 % sur l'augmentation de la température et de 20 % sur la baisse de la température ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement n'est plus aussi marqué entre les scénarios PAC centralisées (S1-RC1 et S1-RC2) et décentralisées (S1-Dref2) lors de la réduction de la température.

Les conclusions générales affirmées restent exactes. La principale évolution est le scénario S1-Dref2 qui est largement le scénario le plus impactant lors de l'augmentation de la température, alors qu'il est équivalent au S1-RC1 dans le cas de référence et dans le cas d'une diminution de la température.

6.2.2.4 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier la température de l'eau.

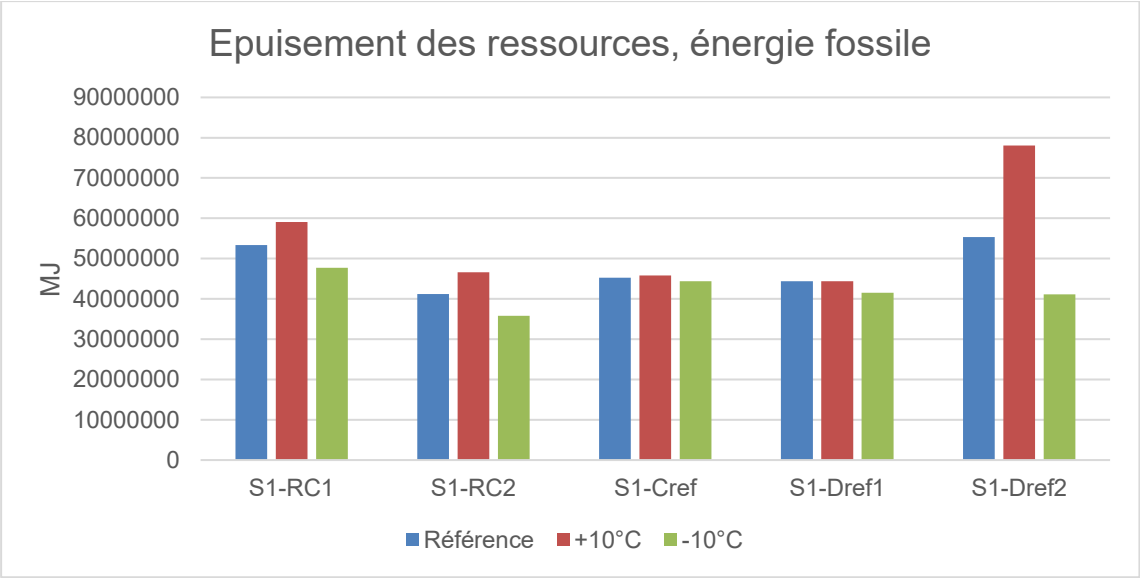


Figure 6-12 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur le scénario S1-Dref2 de 40 % sur l'augmentation de la température et de 25 % sur la baisse de la température ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement reste le même sur les variations de température.

Les conclusions générales affirmées restent exactes. La principale évolution est le scénario S1-Dref2 qui creuse l'écart avec les autres scénarios sur l'augmentation de la température de l'eau.

6.2.2.5 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau.

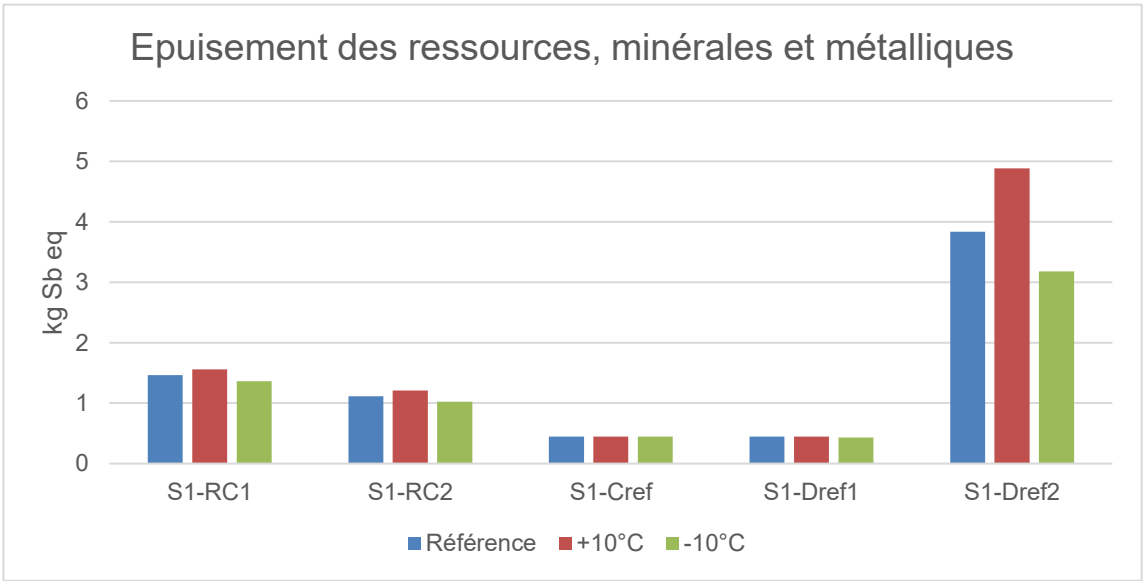


Figure 6-13 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur le scénario S1-Dref2 de 25 % sur l'augmentation de la température et de 20 % sur la baisse de la température : le COP d'une PAC est très dépendant de la différence de température entre la source chaude et la source froide. Le système S1-Dref2 est une pompe à chaleur air/eau. Pendant les périodes les plus froide, la différence de température entre l'air extérieur et l'eau approvisionnée est importante. Une variation de la température de l'eau approvisionnée a donc beaucoup d'influence sur le COP. C'est également valable pour les systèmes S1-RC1 et S1-RC2, mais l'eau pompée dans les sondes ou dans l'aquifère est à une température plus stable toute l'année et plus proche de la température de l'eau approvisionnée : une variation de la température de consigne a donc moins d'influence sur la consommation électrique de la PAC.
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement reste le même sur les variations de température.

Les conclusions générales affirmées restent exactes. La principale évolution est le scénario S1-Dref2 qui creuse l'écart avec les autres scénarios sur l'augmentation de la température de l'eau.

6.2.3 Analyse de sensibilité sur la conductivité du sol

La production du glycol a été identifiée comme un contributeur important à l'impact sur l'épuisement des ressources (cf. 5.2.4) pour les PAC sur sondes géothermiques verticales (S1-RC1). Dans le cas d'étude 1, le glycol est utilisé uniquement pour ce scénario. La quantité de glycol à utiliser dépend du nombre de sondes, qui dépend lui-même de la conductivité thermique du sol. Dans le scénario de référence, nous avons pris l'hypothèse d'une conductivité du sol de 3,1 W/mK. La température du sol est considérée comme constante selon la saison à 15 m et augmentant de 3°C tous les 100 m après 100m[19]. Une analyse de sensibilité est effectuée sur la conductivité du sol pour deux cas extrêmes : moitié moindre (1,55 W/mK) et double (6,2 W/mk).

Les deux variations représentent une variation sur les paramètres suivants :

	Référence (3,1 W/mK)	Conductivité faible (1,55 W/mK)	Conductivité élevée (6,2 W/mK)
Quantité de glycol	118 316 m3	200 372 m3	77 288 m3
Longueur de sonde	32 500 m	65 000 m	16 250 m
Longueur de raccord de sonde	162.5 m	325 m	81 m
Longueur béton sonde	10 400 m	20 800 m	5 200 m
Nombre de forages	162,5	325	81

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des cinq scénarios du cas d'étude 1 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-3 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la conductivité du sol sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S1-RC1			S1-RC2	S1-Cref	S1-Dref1	S1-Dref2
		Réf.	Faible	Elevée	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,10E+06	1,16E+06	1,07E+06	8,58E+05	2,78E+06	3,11E+06	6,14E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,38E-01	3,54E-01	3,30E-01	2,61E-01	4,80E-01	4,94E-01	1,08E+00
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,90E+06	1,91E+06	1,90E+06	1,47E+06	1,64E+05	6,15E+03	2,39E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,98E+03	2,25E+03	1,84E+03	1,43E+03	2,27E+03	2,39E+03	1,46E+03
Particules fines	disease inc.	3,20E-02	3,58E-02	3,00E-02	2,36E-02	9,83E-03	8,00E-03	3,05E-02

[19] http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article98

Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	9,07E-02	9,85E-02	8,69E-02	7,67E-02	3,00E-02	2,21E-02	1,04E-01
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,68E-02	1,79E-02	1,62E-02	1,56E-02	6,79E-03	4,64E-03	1,79E-02
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,89E+03	4,22E+03	3,72E+03	2,87E+03	2,27E+03	2,05E+03	4,22E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,06E+02	2,29E+02	1,94E+02	1,49E+02	4,04E+01	2,85E+01	3,12E+02
Eutrophisation, marine	kg N eq	7,94E+02	8,89E+02	7,47E+02	5,74E+02	6,23E+02	5,58E+02	7,33E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,13E+04	1,22E+04	1,09E+04	8,44E+03	7,01E+03	6,07E+03	1,11E+04
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,81E+05	4,15E+05	3,64E+05	3,23E+05	1,28E+05	9,44E+04	4,60E+05
Usage des sols	Pt	6,90E+06	7,27E+06	6,72E+06	5,40E+06	1,09E+06	5,78E+05	6,04E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,96E+05	5,34E+05	4,77E+05	3,51E+05	5,83E+04	2,35E+04	5,56E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	5,34E+07	5,45E+07	5,28E+07	4,12E+07	4,52E+07	4,43E+07	5,53E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	1,46E+00	1,64E+00	1,37E+00	1,12E+00	4,47E-01	4,49E-01	3,83E+00

Le seul indicateur dont l'évolution, suite à la variation de la conductivité, est supérieure à 10 % de l'impact est l'épuisement des ressources, minérales et métalliques.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 1 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier la conductivité du sol.

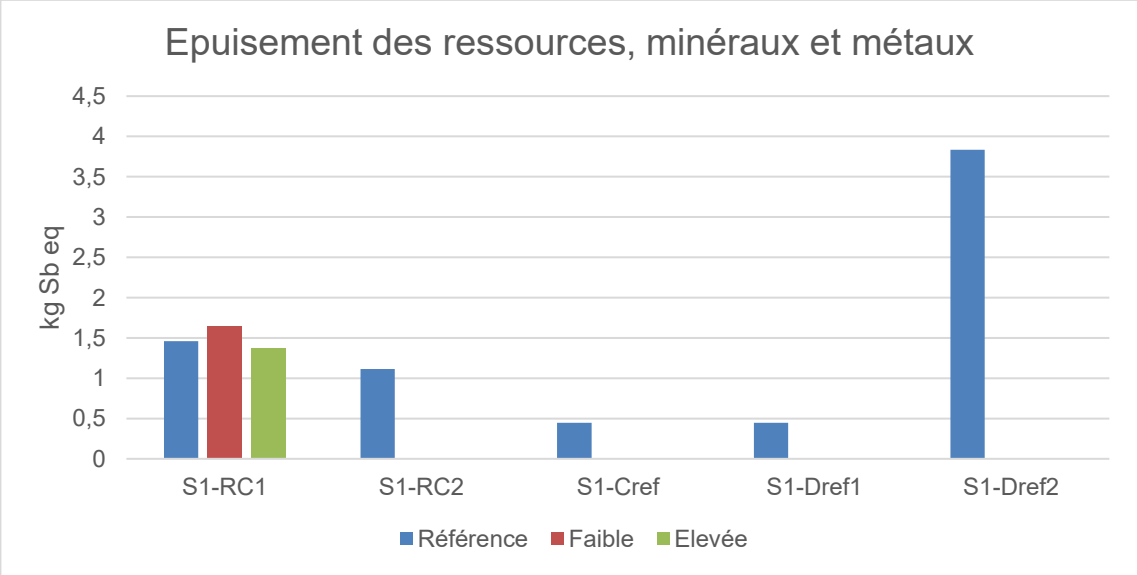


Figure 6-14 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la conductivité du sol sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution de l'impact sur le scénario S1-RC1 de quelques pourcents ;
- L'impact de la valeur de référence se situe entre les deux variations ;
- Le classement reste le même, vis-à-vis des incertitudes.

Une variation significative de la conductivité du sol n'est donc pas à même de modifier les conclusions établies en ce qui concerne le classement entre les différentes solutions techniques comparées.

6.2.4 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Le changement de réfrigérant peut impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements, ce qui n'a pas été considéré dans cette analyse de sensibilité. Seule la nature du réfrigérant a été modifiée, en conservant les performances initiales. Dans le cas de l'analyse de sensibilité sur le réfrigérant, seul l'indicateur changement climatique sera étudié car seul le PRG du réfrigérant a été modifié R134a.

Le tableau suivant fournit l'impact des trois scénarios du cas d'étude 1 concernés par les réfrigérants sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-4 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés

Indicateur	Unité	S1-RC1		S1-RC2		S1-Dref2		S1-Cref	S1-Dref1
		Référence	R134-a	Référence	R134-a	Référence	R134-a	Référence	Référence
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,10E+06	1,13E+06	8,60E+05	8,90E+05	6,14E+05	1,05E+06	2,78E+06	3,11E+06

L'unique indicateur sur lequel la nature du réfrigérant provoque une évolution de l'impact est le changement climatique.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de trois scénarios du cas d'étude 1 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant.

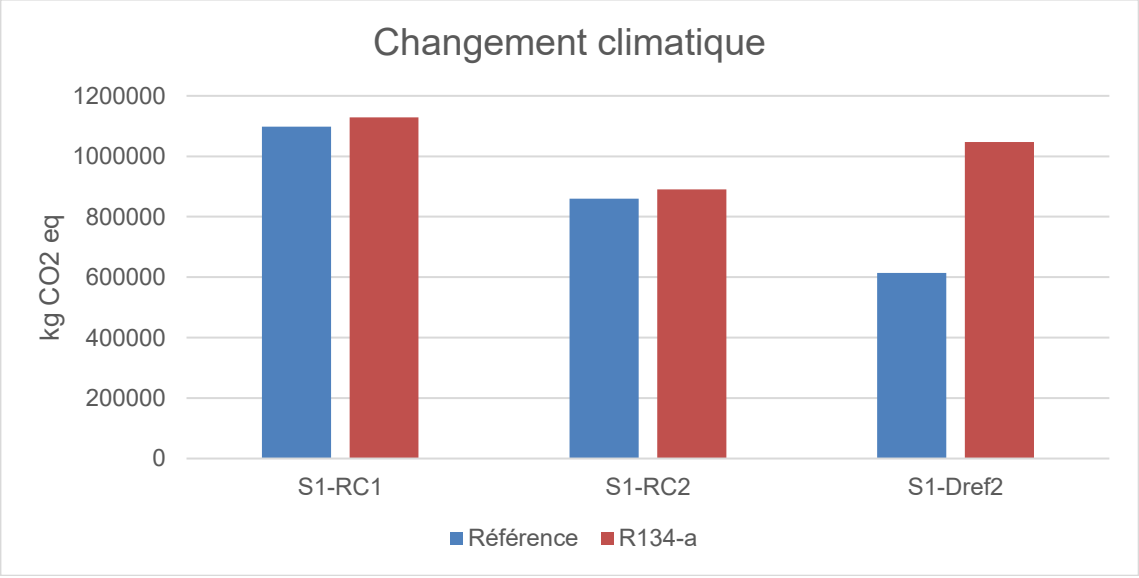


Figure 6-15 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios RC ;
- Evolution plus importante sur le scénario S1-Dref2 due à une charge initiale en réfrigérant plus importante par équipement (5%) ;
- L'impact du scénario S1-Dref2 est multiplié par deux et devient un scénario équivalent au RC2 ;
- Le scénario S1-Dref2 reste inférieur aux deux scénarios à base de chaudières gaz sur cet indicateur (deux fois plus importants).

Les conclusions affirmées entre les chaudières gaz et les PAC restent exactes, cependant ce paramètre est important pour la comparaison entre les PAC centralisées et décentralisées.

6.2.5 Conclusions sur les analyses de sensibilités du cas d'étude 1

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 1 est présentée dans le tableau suivant. Quatre analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 1, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-5 : Cas d'étude 1 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Conductivité du sol	Nature du réfrigérant	Température de l'eau approvisionnée
	Usage	ADEME	Clim.			
Changement climatique						
Particules fines						
Acidification terrestre et d'eau douce						
Epuisement des ressources énergétiques						
Epuisement des ressources minérales et métalliques						

Les analyses de sensibilité pour le cas d'étude 1 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : le fait de modifier le mix entraîne un basculement entre les scénarios à PAC et chaudières uniquement sur l'indicateur de ressource énergétiques avec l'utilisation du mix ADEME, plus spécifiquement un impact plus important des chaudières gaz. Des évolutions de moindre mesure sont effectuées entre les PAC centralisées (RC1 et RC2) et décentralisées (Dref2), principalement avec le mix Usage sur les indicateurs de changement climatique et de particules fines et avec le mix ADEME sur les indicateurs de particules fines, de ressources énergétiques et de ressources minérales et métalliques.
- **Conductivité du sol** : aucune modification du classement entre les différents scénarios sur l'indicateur d'épuisement des ressource métalliques.
- **Nature du réfrigérant** : un changement de la nature du réfrigérant ne modifie pas la hiérarchie entre les chaudières gaz et les PAC, cependant ce paramètre est important pour la comparaison entre les PAC centralisées et décentralisées.
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas la hiérarchie entre les scénarios S1-RC1, S1-RC2, S1-Cref et S1-Dref1. Le scénario S1-Dref2 ne provoque pas de

modification importante sur les indicateurs de changement climatique et ressources minérales et métalliques, cependant sur les autres indicateurs il devient le scénario le plus impactant sur la quasi-totalité des indicateurs lors de l'élévation de la température, et redevient équivalent aux deux autres scénarios PAC lors de l'abaissement de la température.

6.3 Cas d'étude 2

Pour le cas d'étude 2, les analyses de sensibilités suivantes ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix par usage « climatisation » issue du mix industrie du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs ;
- La température de l'eau approvisionnée ;
- La nature du réfrigérant.

6.3.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 2 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-6 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S2-RC				S2-Cref				S2-Dref1				S2-Dref2			
		Référence	Usage	ADEME	Clim	Référence	Usage	ADEME	Clim	Référence	Usage	ADEME	Clim	Référence	Usage	ADEME	Clim
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,41E+05	3,26E+05	1,97E+05	1,59E+05	5,72E+05	6,26E+05	5,59E+05	5,52E+05	6,22E+05	6,99E+05	6,00E+05	5,91E+05	9,56E+04	1,90E+05	6,57E+04	5,50E+04
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	9,81E-02	9,59E-02	6,29E-02	7,25E-02	1,27E-01	1,26E-01	1,11E-01	1,26E-01	4,25E-01	4,23E-01	4,05E-01	4,23E-01	1,12E-01	1,09E-01	8,66E-02	1,09E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	6,25E+05	5,00E+05	2,26E+05	4,23E+05	2,99E+05	2,26E+05	1,08E+05	3,27E+05	3,55E+05	2,44E+05	1,28E+05	3,87E+05	4,49E+05	3,04E+05	1,59E+05	4,84E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	5,16E+02	7,25E+02	4,30E+02	3,74E+02	6,15E+02	7,46E+02	5,90E+02	6,00E+02	6,12E+02	7,98E+02	5,66E+02	5,75E+02	2,38E+02	4,69E+02	1,78E+02	1,89E+02
Particules fines	disease inc.	1,01E-02	9,10E-03	1,51E-02	6,39E-03	6,77E-03	6,31E-03	9,21E-03	5,85E-03	5,89E-03	4,98E-03	8,70E-03	4,52E-03	5,54E-03	4,40E-03	9,06E-03	3,83E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,68E-02	4,17E-02	3,85E-02	3,57E-02	2,70E-02	3,00E-02	2,81E-02	2,95E-02	2,10E-02	2,55E-02	2,21E-02	2,30E-02	1,88E-02	2,47E-02	2,04E-02	2,15E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,86E-03	8,02E-03	8,77E-03	8,03E-03	5,96E-03	6,05E-03	6,40E-03	6,22E-03	3,46E-03	3,60E-03	3,98E-03	3,41E-03	3,49E-03	3,69E-03	4,16E-03	3,45E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,12E+03	1,39E+03	1,77E+03	5,62E+02	8,71E+02	1,05E+03	1,21E+03	7,09E+02	9,29E+02	1,17E+03	1,30E+03	6,86E+02	7,15E+02	1,01E+03	1,18E+03	4,01E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,68E+01	8,47E+01	4,99E+01	4,61E+01	3,93E+01	5,08E+01	3,29E+01	3,53E+01	5,14E+01	6,78E+01	4,26E+01	4,30E+01	5,41E+01	7,45E+01	4,29E+01	4,33E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,22E+02	2,78E+02	1,87E+02	1,52E+02	2,04E+02	2,41E+02	1,93E+02	1,97E+02	2,01E+02	2,51E+02	1,82E+02	1,85E+02	1,24E+02	1,86E+02	9,94E+01	1,03E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,27E+03	3,09E+03	6,77E+03	1,37E+03	2,60E+03	2,56E+03	4,31E+03	1,92E+03	2,56E+03	2,42E+03	4,57E+03	1,67E+03	1,89E+03	1,68E+03	4,38E+03	7,42E+02
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,56E+05	1,64E+05	1,62E+05	1,48E+05	1,13E+05	1,18E+05	1,16E+05	1,17E+05	8,74E+04	9,43E+04	9,02E+04	8,52E+04	8,58E+04	9,53E+04	9,01E+04	8,38E+04
Usage des sols	Pt	2,46E+06	1,72E+06	3,41E+06	3,35E+06	1,43E+06	1,06E+06	1,92E+06	2,66E+06	1,10E+06	5,01E+05	1,67E+06	2,53E+06	1,26E+06	5,04E+05	1,98E+06	3,05E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	1,49E+05	1,35E+05	8,25E+04	9,74E+04	7,64E+04	6,87E+04	4,51E+04	7,78E+04	8,61E+04	7,40E+04	4,84E+04	8,66E+04	1,01E+05	8,58E+04	5,36E+04	1,02E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,57E+07	1,43E+07	7,11E+06	1,06E+07	1,44E+07	1,36E+07	1,04E+07	1,47E+07	1,57E+07	1,45E+07	1,09E+07	1,60E+07	1,01E+07	8,49E+06	3,94E+06	1,03E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,57E-01	7,04E-01	1,21E+00	6,85E-01	4,70E-01	4,88E-01	7,20E-01	4,92E-01	7,85E-01	8,22E-01	1,09E+00	7,56E-01	7,06E-01	7,98E-01	1,14E+00	7,15E-01

6.3.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

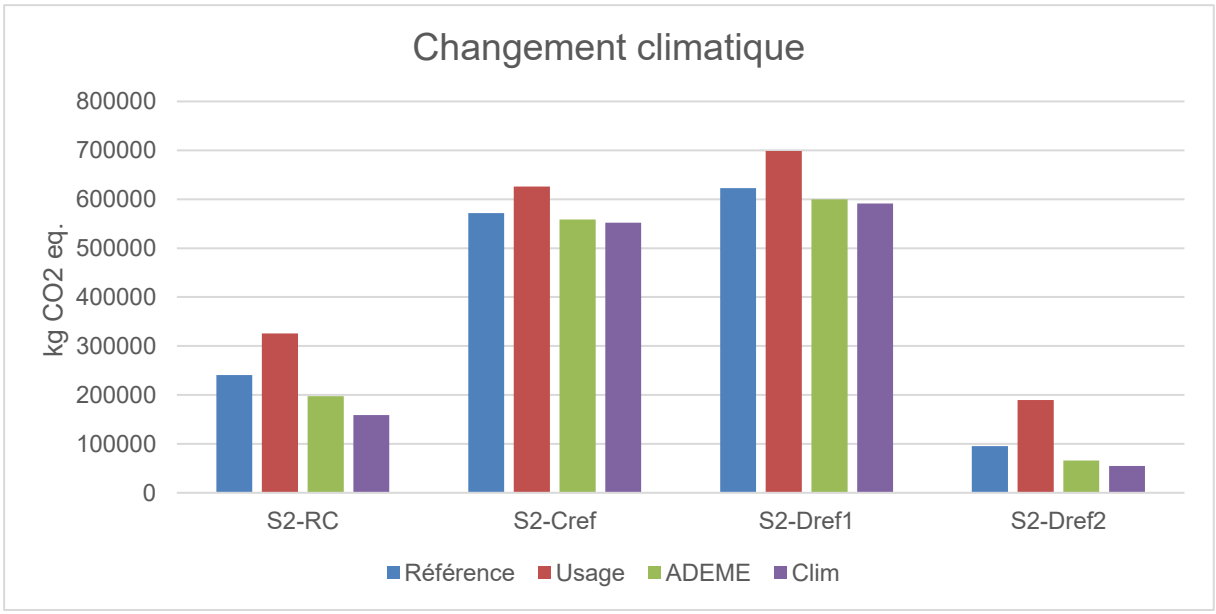


Figure 6-16 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- On retrouve la même évolution sur tous les scénarios, avec un impact supérieur du mix Usage, encore plus marqué sur les scénarios avec TFP plus grands consommateurs d'électricité (S2-RC et S2-Dref2);
- L'impact du mix de référence est inférieur au mix Usage et légèrement supérieur aux mix ADEME et Clim sur tous les scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, malgré une évolution plus importante sur les scénarios avec TFP S2-Dref2 et S2-RC, plus grands consommateurs d'électricité, lors de la modélisation avec le mix Usage.

6.3.1.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

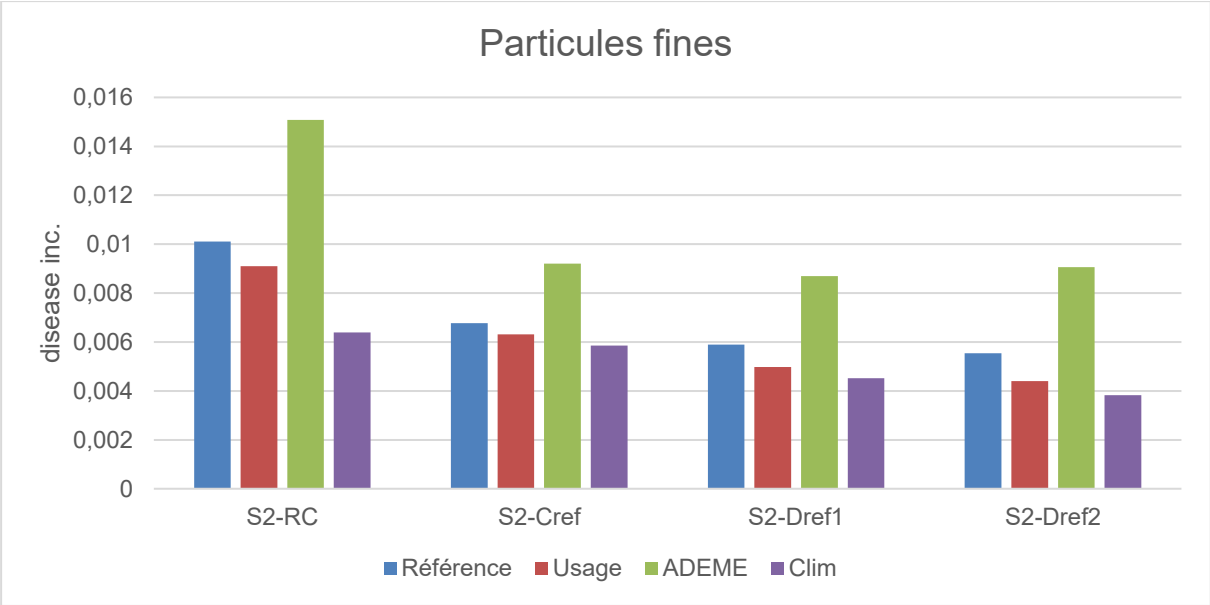


Figure 6-17 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- On retrouve un impact plus important de tous les scénarios avec le mix ADEME, encore plus marqué sur les scénarios avec TFP plus grands consommateurs d'électricité (S2-RC et S2-Dref2) ;
- L'impact du mix de référence est inférieur au mix ADEME et légèrement supérieur aux mix Usage et Clim sur tous les scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes avec le mix Usage et ADEME, cependant le mix Clim ne permet plus de départager les deux scénarios centralisés S2-RC et S2-Cref.

6.3.1.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

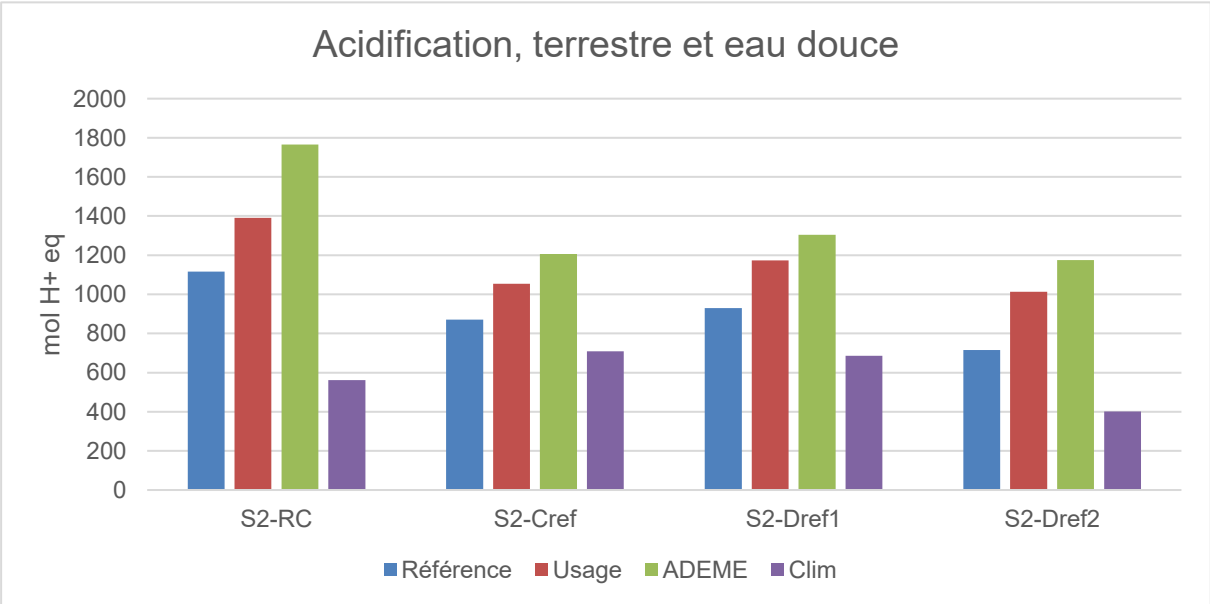


Figure 6-18 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- On retrouve la même évolution sur tous les scénarios, avec un impact supérieur du mix ADEME, encore plus marqué sur les scénarios avec TFP plus grands consommateurs d'électricité (S2-RC et S2-Dref2) ;
- L'impact du mix de référence est inférieur au mix ADEME et Usage et supérieur aux mix Clim sur tous les scénarios ;
- Le classement entre les scénarios n'est plus le même sur le mix Clim.

Les conclusions affirmées restent exactes avec le mix Usage et ADEME, cependant le mix Clim montre un impact plus important des scénarios avec chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1).

6.3.1.4 *Epuisement des ressources énergétiques*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

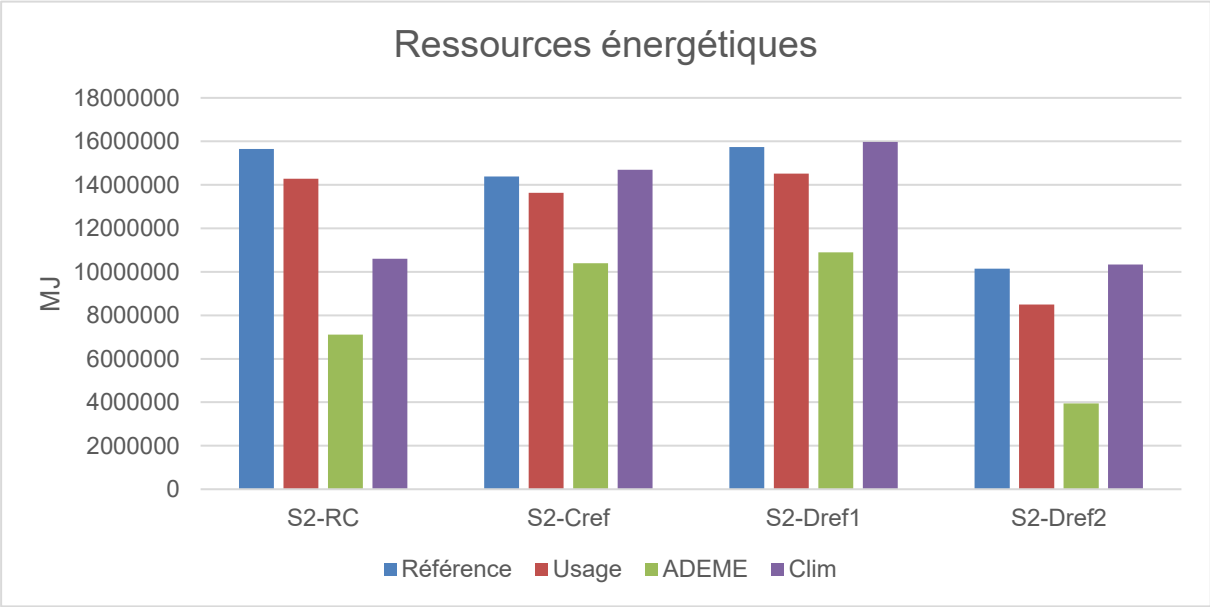


Figure 6-19 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- L'impact des scénarios avec le mix Usage est équivalent au mix de référence ;
- Le mix Clim montre un impact plus faible du scénario avec TFP centralisées (S2-RC) ;
- Le mix ADEME montre un impact plus faible de tous les scénarios et plus intensément sur les scénarios avec TFP centralisées et décentralisées (S2-RC et S2-Dref2), bénéfice de la réduction du nucléaire ;
- Le classement entre les scénarios n'est donc plus le même avec les mix Clim et ADEME.

Les conclusions affirmées restent exactes avec le mix Usage, cependant les mix Clim et ADEME inversent le classement entre les scénarios chaudières/GF (S2-Cref et S2-Dref1) et TFP centralisées (S2-RC) à l'avantage de ce dernier.

6.3.1.5 *Epuisement des ressources, minérales et métalliques*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

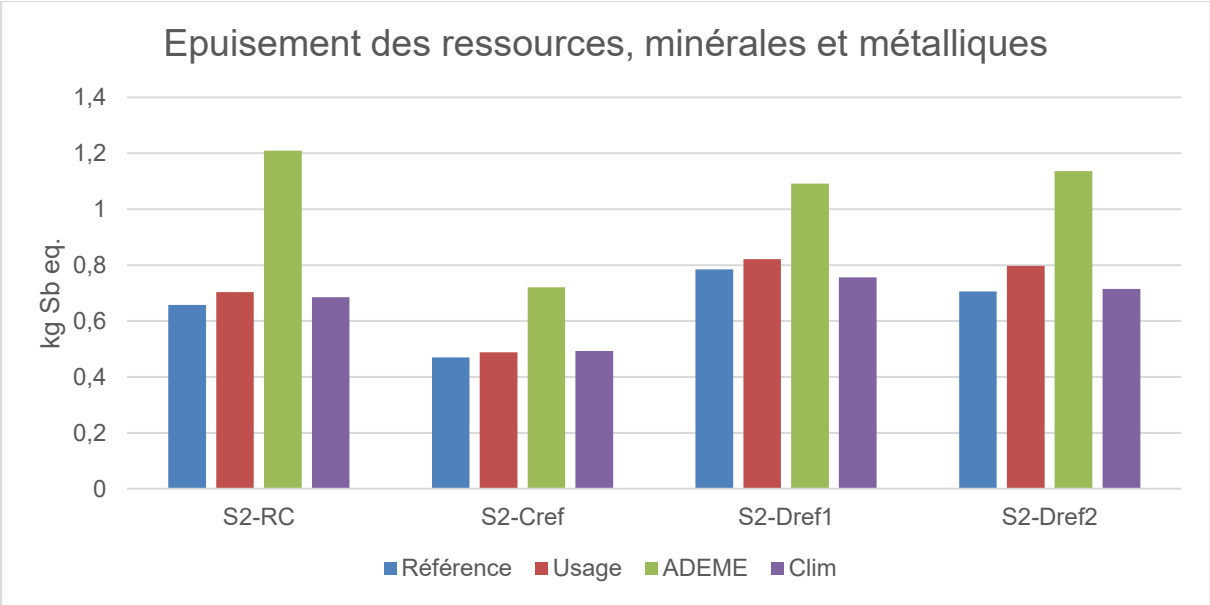


Figure 6-20 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- On retrouve la même évolution sur tous les scénarios, avec un impact supérieur du mix ADEME, plus important sur le scénario TFP centralisées S2-RC ;
- L'impact du mix de référence est équivalent aux mix Usage et Clim sur chaque scénario ;
- Le mix ADEME montre un impact plus important de tous les scénarios et plus intensément sur les scénarios avec TFP centralisées et décentralisées (S2-RC et S2-Dref2) ;
- Le classement entre les scénarios est identique avec les mix Usage et Clim, mais diffère avec le mix ADEME.

Le mix de référence montre l'avantage des scénarios centralisés (S2-RC et S2-Cref) sur les décentralisés (S2-Dref1 et S2-Dref2), le mix Usage et Clim viennent confirmer cette conclusion, contrairement au mix ADEME qui montre l'impact supérieur du scénario TFP centralisées (S2-RC) lié principalement à la demande importante de ressources du photovoltaïque.

6.3.2 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau dans le circuit secondaire de chaque bâtiment : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle chaude 50/40°C et une boucle froide 7°C /12°C.

L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 10°C pour la boucle chaude est de 2°C pour la boucle froide :

- Scénario + 10°C :
  - boucle chaude 60°C / 50°C
  - boucle froide 7°C /12°C
- Scénario - 10°C :
  - boucle chaude 40°C / 30°C
  - boucle froide 7°C /12°C
- Scénario + 2°C :
  - boucle chaude 50°C / 40°C
  - boucle froide 9°C /14°C
- Scénario - 2°C :
  - boucle chaude 50°C / 40°C
  - boucle froide 5°C /10°C

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant uniquement la température de consigne. Selon la performance thermique d'un bâtiment, sa courbe de demande de chaleur n'est pas la même (par exemple, les bâtiments les mieux isolés ont des besoins de chaleur qui sont plus concentrés sur les périodes les plus froides). Cette analyse de sensibilité est donc une approche simplifiée. Les consommations énergétiques obtenues sont les suivantes :

		Référence	Chaud +10°C	Chaud -10°C	Froid +2°C	Froid -2°C
Consommation de gaz (kWh)	RC	329 980	329 980	323 372	329 980	329 980
	Cref	1 964 774	1 993 190	1 925 558	1 964 774	1 964 774
	Dref1	1 998 900	2 080 380	1 956 340	1 998 900	1 998 900
	Dref2	-	-	-	-	-
Consommation d'électricité des TFP (kWh)	RC	490 592	876 807	687 876	741 547	821 385
	Cref	-	-	-	-	-
	Dref1	-	-	-	-	-
	Dref2	811 360	1 054 340	592 100	766 820	858 940
Consommation d'électricité des GF (kWh)	RC	290 605	-	-	-	-
	Cref	434 152	434 152	434 152	406 449	462 965
	Dref1	646 800	646 800	646 800	593 920	702 960
	Dref2	-	-	-	-	-
COP	RC	TFP COP chaud 3,3 EFF TFP global 5,6 EER GF 5,1	TFP COP chaud 2,8 EFF TFP global 4,6 EER GF 5,1	TFP COP chaud 4,0 EFF TFP global 7,0 EER GF 5,0	TFP COP chaud 3,4 EFF TFP global 5,8 EER GF 5,4	TFP COP chaud 3,1 EFF TFP global 5,3 EER GF 5,3
	Cref	5,8	5,8	5,8	6,2	5,5
	Dref1	3,9	3,9	3,9	4,3	3,6
	Dref2	TFP COP chaud 4,4 EFF TFP global 5,2	TFP COP chaud 3,6 EFF TFP global 4	TFP COP chaud 5,8 ; EFF TFP global 7,2	TFP COP chaud 4,6 ; EFF TFP global 5,5	TFP COP chaud 4,2 ; EFF TFP global 4,9

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 2 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-7 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S2-RC					S2-Cref					S2-Dref1					S2-Dref2				
		Référence	+10°C	-10°C	+2°C	-2°C	Référence	+10°C	-10°C	+2°C	-2°C	Référence	+10°C	-10°C	+2°C	-2°C	Référence	+10°C	-10°C	+2°C	-2°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,41E+05	2,65E+05	2,41E+05	2,49E+05	2,58E+05	5,72E+05	5,79E+05	5,62E+05	5,70E+05	5,74E+05	6,22E+05	6,45E+05	6,11E+05	6,17E+05	6,28E+05	9,56E+04	1,21E+05	7,23E+04	9,08E+04	1,01E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	9,81E-02	1,04E-01	9,39E-02	9,70E-02	1,01E-01	1,27E-01	1,28E-01	1,25E-01	1,25E-01	1,28E-01	4,25E-01	4,28E-01	4,23E-01	4,22E-01	4,28E-01	1,12E-01	1,25E-01	1,00E-01	1,10E-01	1,15E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	6,25E+05	6,66E+05	5,71E+05	5,98E+05	6,38E+05	2,99E+05	2,99E+05	2,99E+05	2,85E+05	3,14E+05	3,55E+05	3,55E+05	3,55E+05	3,26E+05	3,86E+05	4,49E+05	5,83E+05	3,28E+05	4,25E+05	4,76E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	5,16E+02	5,67E+02	5,16E+02	5,31E+02	5,52E+02	6,15E+02	6,20E+02	6,08E+02	6,10E+02	6,20E+02	6,12E+02	6,29E+02	6,04E+02	5,99E+02	6,27E+02	2,38E+02	3,00E+02	1,83E+02	2,27E+02	2,50E+02
Particules fines	disease inc.	1,01E-02	1,08E-02	9,76E-03	1,01E-02	1,05E-02	6,77E-03	6,78E-03	6,74E-03	6,63E-03	6,91E-03	5,89E-03	5,94E-03	5,86E-03	5,57E-03	6,23E-03	5,54E-03	7,02E-03	4,21E-03	5,27E-03	5,83E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,68E-02	3,82E-02	3,60E-02	3,66E-02	3,75E-02	2,70E-02	2,70E-02	2,69E-02	2,67E-02	2,73E-02	2,10E-02	2,11E-02	2,09E-02	2,01E-02	2,19E-02	1,88E-02	2,27E-02	1,54E-02	1,81E-02	1,96E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,86E-03	8,02E-03	7,73E-03	7,82E-03	7,94E-03	5,96E-03	5,97E-03	5,95E-03	5,92E-03	6,00E-03	3,46E-03	3,49E-03	3,45E-03	3,26E-03	3,67E-03	3,49E-03	4,39E-03	2,68E-03	3,33E-03	3,67E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,12E+03	1,24E+03	1,10E+03	1,14E+03	1,20E+03	8,71E+02	8,76E+02	8,64E+02	8,54E+02	8,88E+02	9,29E+02	9,44E+02	9,22E+02	8,88E+02	9,73E+02	7,15E+02	9,08E+02	5,40E+02	6,80E+02	7,53E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,68E+01	7,32E+01	6,57E+01	6,79E+01	7,10E+01	3,93E+01	3,93E+01	3,92E+01	3,84E+01	4,02E+01	5,14E+01	5,16E+01	5,14E+01	4,87E+01	5,43E+01	5,41E+01	6,65E+01	4,28E+01	5,18E+01	5,65E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,22E+02	2,42E+02	2,18E+02	2,25E+02	2,35E+02	2,04E+02	2,06E+02	2,02E+02	2,01E+02	2,07E+02	2,01E+02	2,05E+02	1,99E+02	1,94E+02	2,08E+02	1,24E+02	1,55E+02	9,56E+01	1,18E+02	1,30E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,27E+03	3,59E+03	3,18E+03	3,30E+03	3,47E+03	2,60E+03	2,61E+03	2,58E+03	2,54E+03	2,65E+03	2,56E+03	2,61E+03	2,54E+03	2,45E+03	2,69E+03	1,89E+03	2,43E+03	1,41E+03	1,80E+03	2,00E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,56E+05	1,62E+05	1,53E+05	1,56E+05	1,60E+05	1,13E+05	1,13E+05	1,12E+05	1,11E+05	1,14E+05	8,74E+04	8,80E+04	8,71E+04	8,29E+04	9,22E+04	8,58E+04	1,06E+05	6,72E+04	8,20E+04	8,98E+04
Usage des sols	Pt	2,46E+06	2,55E+06	2,30E+06	2,37E+06	2,48E+06	1,43E+06	1,43E+06	1,43E+06	1,40E+06	1,47E+06	1,10E+06	1,10E+06	1,09E+06	1,02E+06	1,18E+06	1,26E+06	1,62E+06	9,43E+05	1,20E+06	1,33E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	1,49E+05	1,60E+05	1,39E+05	1,45E+05	1,54E+05	7,64E+04	7,65E+04	7,64E+04	7,33E+04	7,97E+04	8,61E+04	8,63E+04	8,61E+04	7,97E+04	9,30E+04	1,01E+05	1,31E+05	7,46E+04	9,59E+04	1,07E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,57E+07	1,68E+07	1,46E+07	1,52E+07	1,61E+07	1,44E+07	1,45E+07	1,42E+07	1,41E+07	1,47E+07	1,57E+07	1,61E+07	1,56E+07	1,51E+07	1,64E+07	1,01E+07	1,31E+07	7,43E+06	9,59E+06	1,07E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,57E-01	6,63E-01	6,24E-01	6,35E-01	6,52E-01	4,70E-01	4,71E-01	4,70E-01	4,63E-01	4,77E-01	7,85E-01	7,87E-01	7,84E-01	7,53E-01	8,19E-01	7,06E-01	8,38E-01	5,86E-01	6,81E-01	7,32E-01

6.3.2.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau.

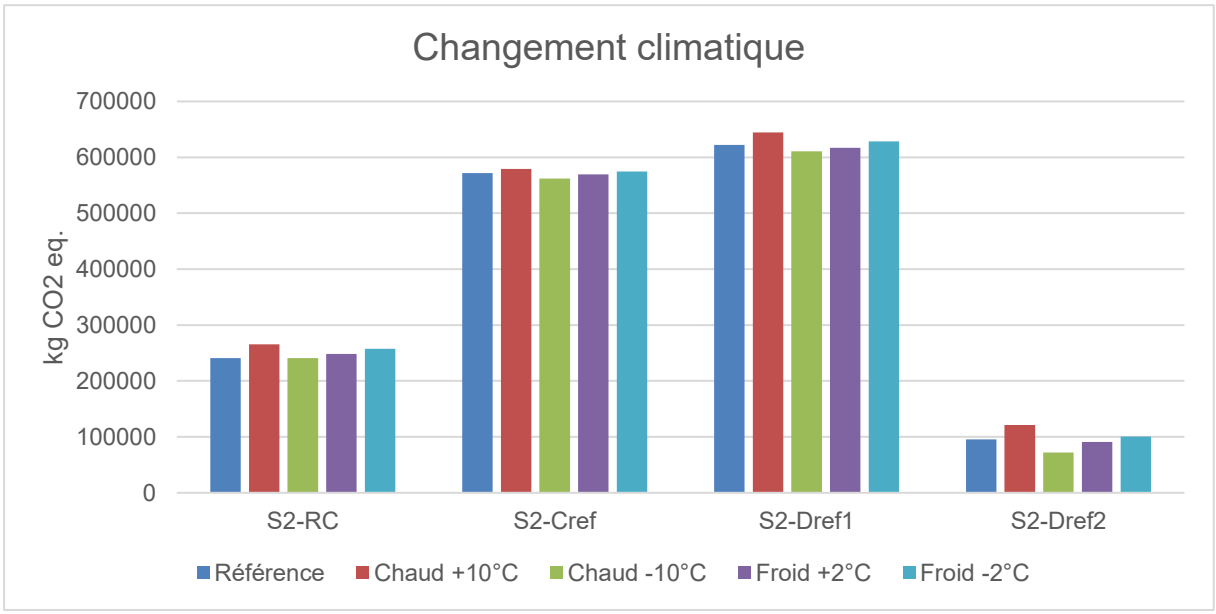


Figure 6-21 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.3.2.2 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau.

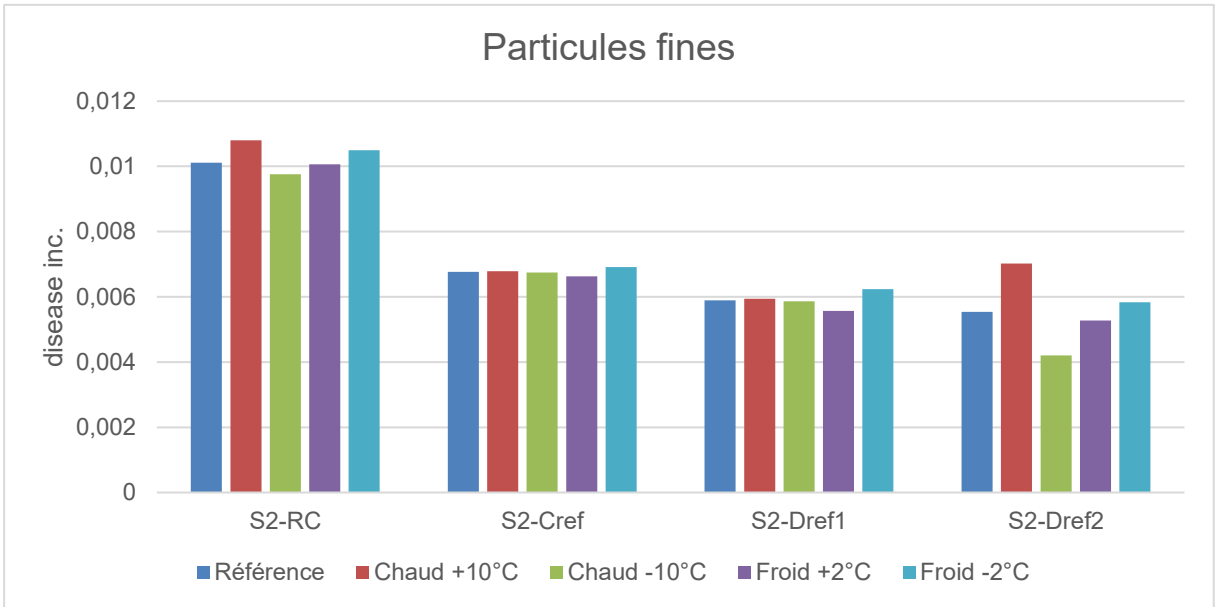


Figure 6-22 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables sur les scénarios chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) ;
- Evolutions négligeables sur la modification de la boucle froide sur tous les scénarios ;
- L'évolution de la boucle chaude fait varier le scénario TFP décentralisées (S2-Dref2), mais pas assez significativement pour modifier les conclusions apportées.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant pas assez significatives vis-à-vis des incertitudes en ACV.

6.3.2.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau.

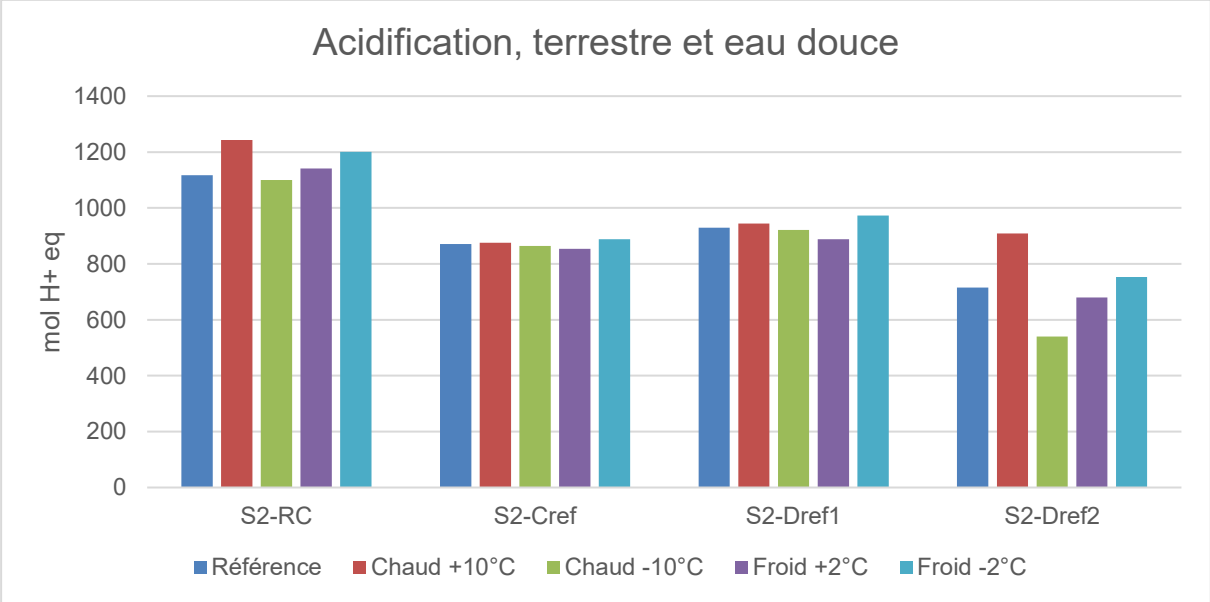


Figure 6-23 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables sur les scénarios chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) ;
- Evolutions négligeables sur la modification de la boucle froide sur tous les scénarios ;
- L'évolution de la boucle chaude fait varier le scénario TFP décentralisées (S2-Dref2), notamment sur l'augmentation de la température qui place ce scénario à équivalence des scénarios avec chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1).

Les conclusions affirmées restent exactes, excepté sur l'augmentation de la boucle chaude qui montre l'impact des TFP décentralisées équivalents aux scénarios avec chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1).

6.3.2.4 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier la température de l'eau.

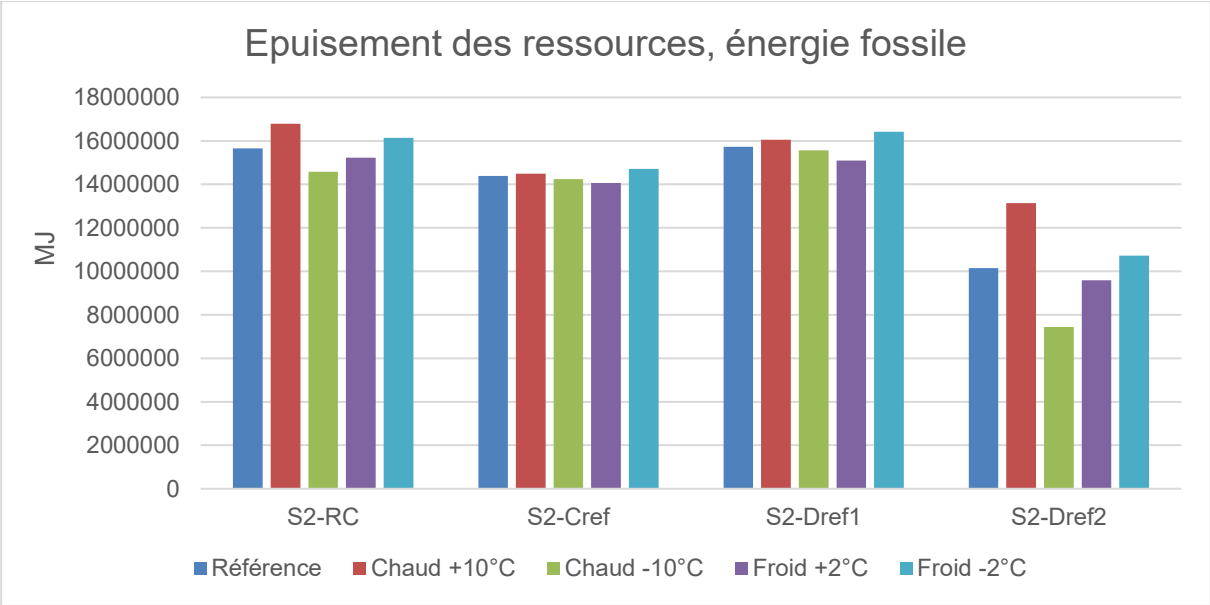


Figure 6-24 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables sur les scénarios chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) ;
- Evolutions négligeables sur la modification de la boucle froide sur tous les scénarios ;
- L'évolution de la boucle chaude fait varier le scénario TFP décentralisées (S2-Dref2), mais pas assez significativement pour modifier les conclusions apportées.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant pas assez significatives vis-à-vis aux incertitudes en ACV.

6.3.2.5 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau.

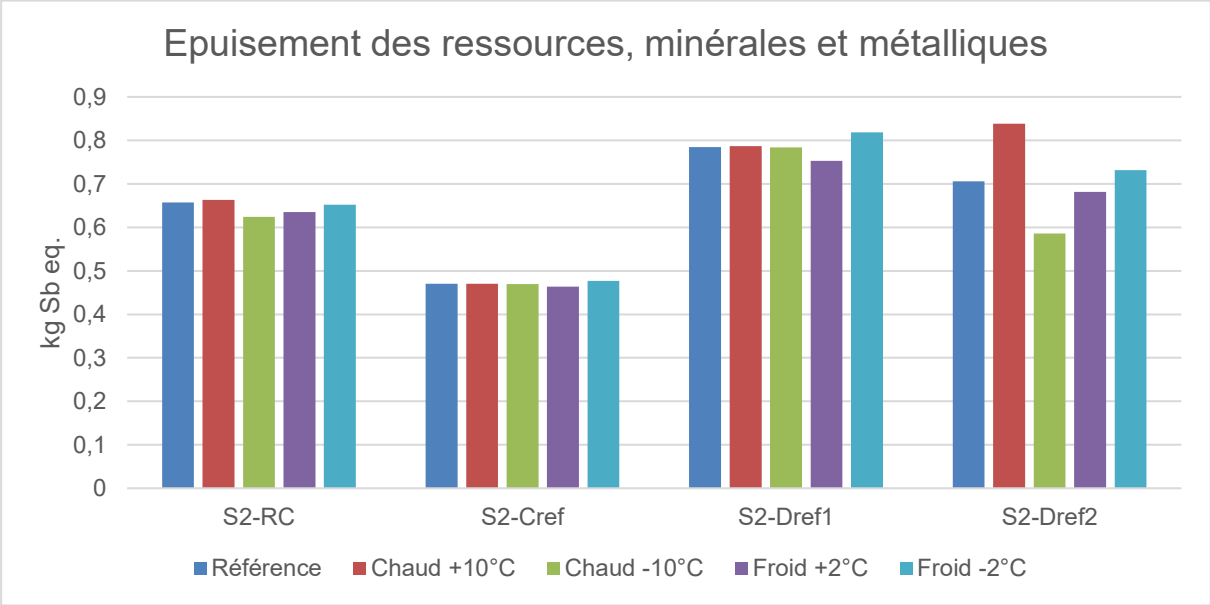


Figure 6-25 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables sur les scénarios chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) ;
- Evolutions négligeables sur la modification de la boucle froide sur tous les scénarios ;
- L'évolution de la boucle chaude fait varier le scénario TFP décentralisées (S2-Dref2), mais pas assez significativement pour modifier les conclusions apportées.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant pas assez significatives vis-à-vis aux incertitudes en ACV.

6.3.3 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Le changement de réfrigérant peut impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements, ce qui n'a pas été considéré dans cette analyse de sensibilité. Seule la nature du réfrigérant a été modifiée, en conservant les performances initiales. Dans le cas de l'analyse de sensibilité sur le réfrigérant, seul l'indicateur changement climatique sera étudié car seul le PRG du réfrigérant a été modifié R134-a.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 2 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-8 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés

Indicateur	Unité	S2-RC		S2-Cref		S2-Dref1		S2-Dref2	
		Référence	R134-a	Référence	R134-a	Référence	R134-a	Référence	R134-a
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,41E+05	2,52E+05	5,72E+05	6,02E+05	6,22E+05	7,03E+05	9,56E+04	1,43E+05

L'unique indicateur sur lequel la nature du réfrigérant provoque une évolution de l'impact est le changement climatique.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 2 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant.

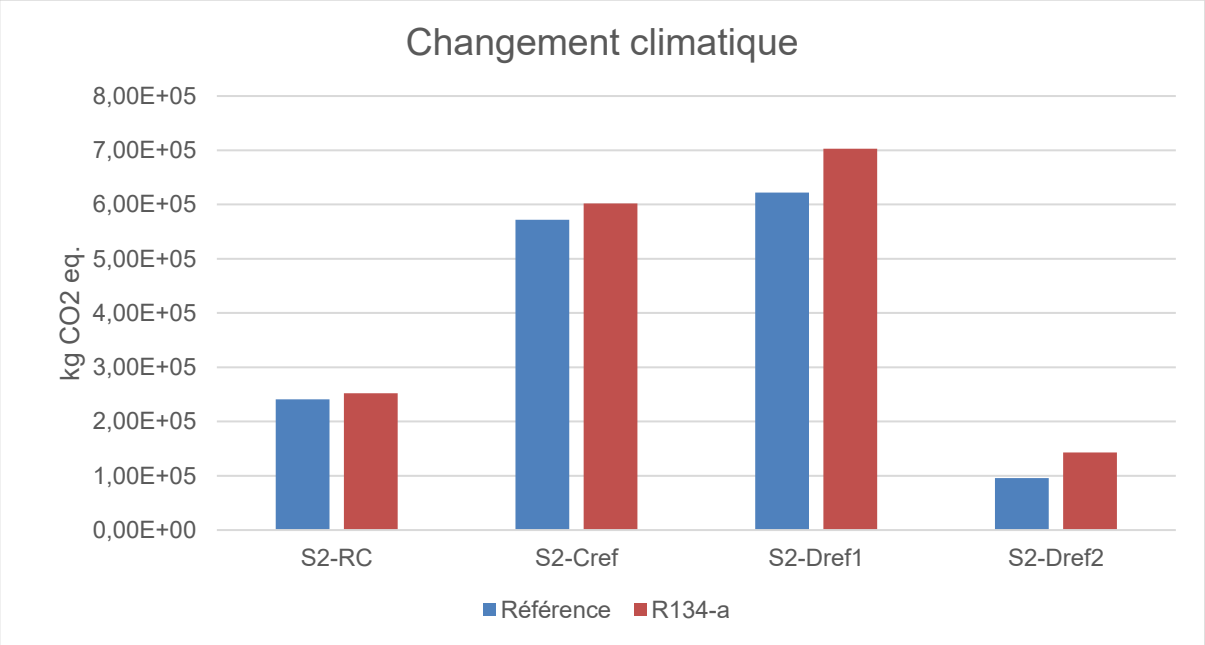


Figure 6-26 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables sur les scénarios centralisées (S2-RC et S2-Cref) ;
- Evolution plus significative sur les scénarios décentralisés (S2-Dref1 et S2-Dref2) ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les impacts des scénarios avec chaudières/GF restant supérieurs aux scénarios avec TFP.

6.3.4 Conclusions sur les analyses de sensibilités sur le cas d'étude 2

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 2 est présentée dans le tableau suivant. Trois analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 2, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-9 : Cas d'étude 2 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Nature du réfrigérant	Température de l'eau approvisionnée
	Usage	ADEME	Clim.		
Changement climatique					
Particules fines					
Acidification terrestre et d'eau douce					
Epuisement des ressources énergétiques					
Epuisement des ressources minérales et métalliques					

Les analyses de sensibilité dans le scénario 2 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : le mix électrique utilisé a une influence sur le classement entre les différents systèmes comparés :
  - Avec le mix par usage « climatisation » issu du mix industriel du référentiel « Energie-Carbone » :
    - sur l'indicateur particules fines, les différences entre les systèmes centralisés à base de TFP (S2-RC) et à base de chaudières gaz et groupes froids aérothermiques (S2-Cref) ne sont plus significatives lorsque ce mix est utilisé ;
    - sur les indicateurs acidification terrestre et d'eau douce et épuisement des ressources énergétiques, les systèmes centralisés et décentralisés à base de TFP (S2-RC et S2-Dref2) ont une performance équivalente, et supérieure à celle des deux autres lorsque ce mix est utilisé ;
  - Avec le mix ADEME Visions 2050 Médian :
    - Sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques, le système décentralisé à base de TFP (S2-Dref2) reste le plus performant lorsque ce mix est utilisé, mais il est suivi du système centralisé à base de TFP (S2-RC), qui cause moins d'impacts que les systèmes de référence à base de chaudières gaz et de groupes froid aérothermiques (S2-Cref et S2-Dref1).
    - Sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques, les différences entre les systèmes S2-RC, S2-Dref1 et S2-Dref2 ne sont plus significatives lorsque ce mix est utilisé. Le système S2-Cref reste le plus performant.
  - Avec le mix par usage « chauffage », il y a très peu d'évolutions sur tous les indicateurs analysées. Une évolution plus importante est remarquée sur les scénarios TFP (S2-RC et S2-Dref2), plus grands consommateurs d'électricité.
- **Nature du réfrigérant** : un changement de la nature du réfrigérant ne modifie pas la hiérarchie entre les 4 scénarios.
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement sur la boucle froid ne modifie pas la hiérarchie entre les scénarios. Les évolutions sur les scénarios chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) sont négligeables sur tous les indicateurs et sur chaque boucle. L'augmentation de la boucle chaude provoque des impacts des TFP décentralisées (S2-Dref2) équivalents aux scénarios avec chaudières gaz/GF (S2-Cref et S2-Dref1) sur les indicateurs de particule fines et d'acidification. Le scénario TFP décentralisées S2-Dref2 devient le scénario le plus impactant sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

6.4 Cas d'étude 3

Pour le cas d'étude 3, différentes analyses de sensibilités ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix par usage « climatisation » issue du mix industrie du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs ;
- La température de l'eau approvisionnée ;
- La nature du réfrigérant ;
- Pour le scénario S3-RC, la valeur du paramètre B dans les formules de la méthode CFF est modifiée : elle passe d'une valeur B=1 où la chaleur fatale est considérée comme gratuite à une valeur B=0 (recommandée par les guides méthodologiques) qui donne donc les bénéfices au producteur de la chaleur. Dans ce dernier cas, la chaleur fatale sera modélisée par de la combustion de gaz naturel.

6.4.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 3 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-10 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S3-RC				S3-Cref				S3-Dref			
		Référence	**Usage**	**ADEME**	**Clim**	**Référence**	**Usage**	**ADEME**	**Clim**	**Référence**	**Usage**	**ADEME**	**Clim**
Changement climatique	kg CO_2 eq	4,38E+04	6,14E+04	3,33E+04	2,98E+04	4,95E+04	9,99E+04	3,85E+04	3,27E+04	9,28E+04	2,32E+05	7,53E+04	6,18E+04
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	4,03E-02	4,01E-02	3,01E-02	4,03E-02	5,78E-02	5,73E-02	4,37E-02	5,75E-02	1,03E-01	6,73E-02	3,88E-02	6,78E-02
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,85E+05	1,62E+05	6,67E+04	2,09E+05	2,64E+05	1,97E+05	9,34E+04	2,88E+05	5,70E+05	3,83E+05	1,99E+05	6,10E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,20E+02	1,62E+02	9,86E+01	1,09E+02	1,24E+02	2,46E+02	1,04E+02	1,13E+02	2,40E+02	5,69E+02	2,02E+02	2,16E+02
Particules fines	disease inc.	2,81E-03	2,65E-03	4,29E-03	2,27E-03	2,99E-03	2,58E-03	5,18E-03	2,17E-03	6,33E-03	5,10E-03	1,10E-02	4,38E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	1,19E-02	1,28E-02	1,25E-02	1,41E-02	1,16E-02	1,44E-02	1,26E-02	1,38E-02	2,22E-02	2,96E-02	2,42E-02	2,56E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-03	2,16E-03	2,41E-03	2,59E-03	1,71E-03	1,80E-03	2,10E-03	1,92E-03	4,00E-03	4,25E-03	4,85E-03	3,95E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,36E+02	3,95E+02	5,36E+02	2,35E+02	3,57E+02	5,29E+02	6,62E+02	2,16E+02	7,66E+02	1,23E+03	1,44E+03	4,59E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,52E+01	2,89E+01	2,07E+01	2,42E+01	2,54E+01	3,62E+01	2,00E+01	2,20E+01	5,93E+01	8,99E+01	4,98E+01	5,04E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	6,08E+01	7,24E+01	5,20E+01	5,58E+01	6,76E+01	1,02E+02	5,83E+01	6,14E+01	1,35E+02	2,27E+02	1,18E+02	1,22E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	9,70E+02	9,56E+02	2,02E+03	5,34E+02	1,04E+03	1,01E+03	2,57E+03	4,43E+02	2,11E+03	2,05E+03	5,45E+03	8,60E+02
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	4,60E+04	4,77E+04	4,77E+04	5,36E+04	4,20E+04	4,72E+04	4,53E+04	4,58E+04	9,86E+04	1,12E+05	1,05E+05	9,70E+04
Usage des sols	Pt	6,32E+05	4,96E+05	9,15E+05	1,41E+06	7,71E+05	4,34E+05	1,21E+06	1,86E+06	1,69E+06	5,85E+05	2,45E+06	3,80E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,42E+04	4,17E+04	2,45E+04	4,61E+04	6,02E+04	5,31E+04	3,22E+04	6,13E+04	1,26E+05	1,07E+05	6,59E+04	1,27E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	4,24E+06	4,00E+06	1,73E+06	4,53E+06	5,90E+06	5,21E+06	2,33E+06	6,17E+06	1,25E+07	1,06E+07	4,89E+06	1,30E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,24E-01	3,28E-01	4,83E-01	3,89E-01	3,10E-01	3,26E-01	5,33E-01	3,25E-01	8,95E-01	9,35E-01	1,36E+00	8,32E-01

6.4.1.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

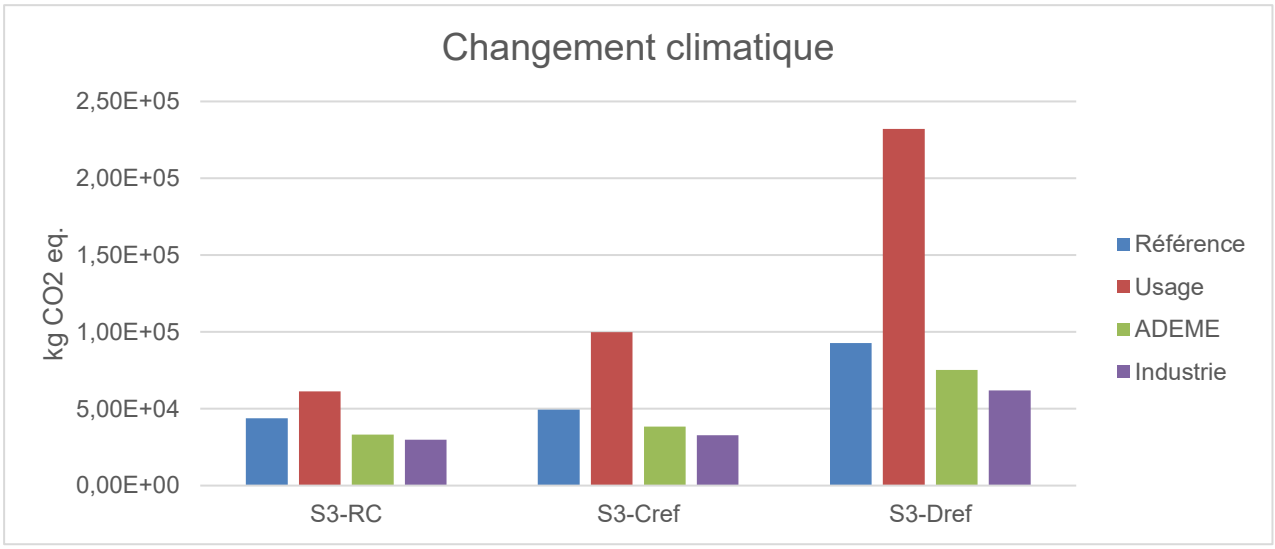


Figure 6-27 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation importante de l'impact (multiplié par 2,5) sur le mix Usage pour le scénario avec GF décentralisés S3-Dref qui est le plus grand consommateur d'électricité ;
- Evolution négligeable sur les autres scénarios et autres mix ;
- Le classement entre les scénarios est identique, mais plus marqué sur le mix Usage.

Les conclusions affirmées restent exactes, malgré une évolution importante sur le S3-Dref2 lors de la modélisation avec le mix Usage.

6.4.1.2 *Toxicité humaine, effets non-cancérogènes*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de toxicité humaine, effets non-cancérogènes en faisant varier le mix électrique.

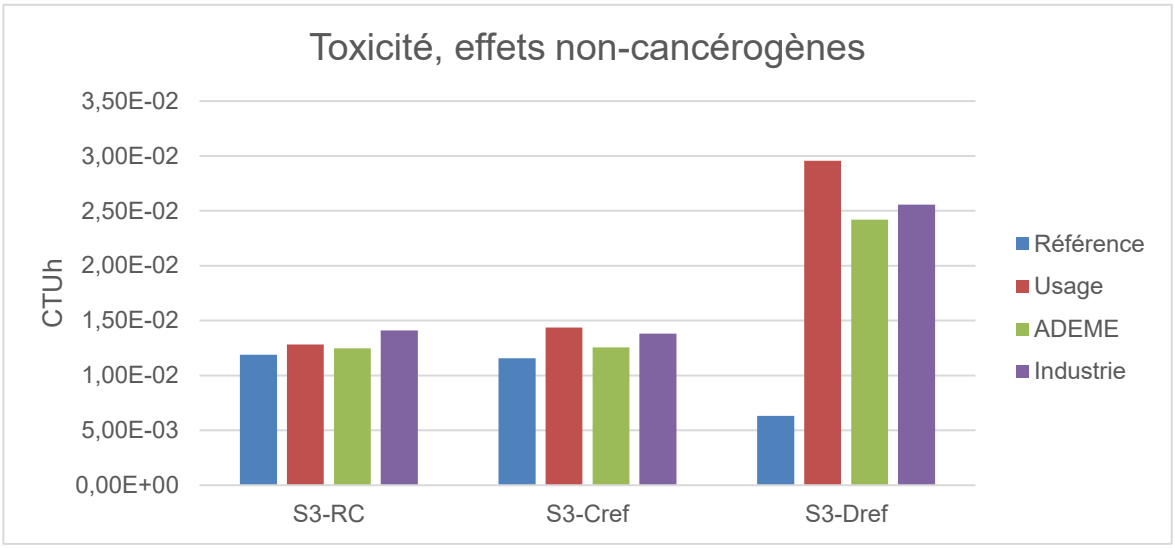


Figure 6-28 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur toxicité humaine non-cancérogène

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation de l'impact légèrement plus importante avec le mix Usage sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref qui est le plus grand consommateur d'électricité ;
- Evolution négligeable sur les autres scénarios et autres mix ;
- Le classement entre les scénarios est identique, mais plus marqué sur le mix Usage.

Les conclusions affirmées lors de l'analyse de contribution restent exactes.

6.4.1.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

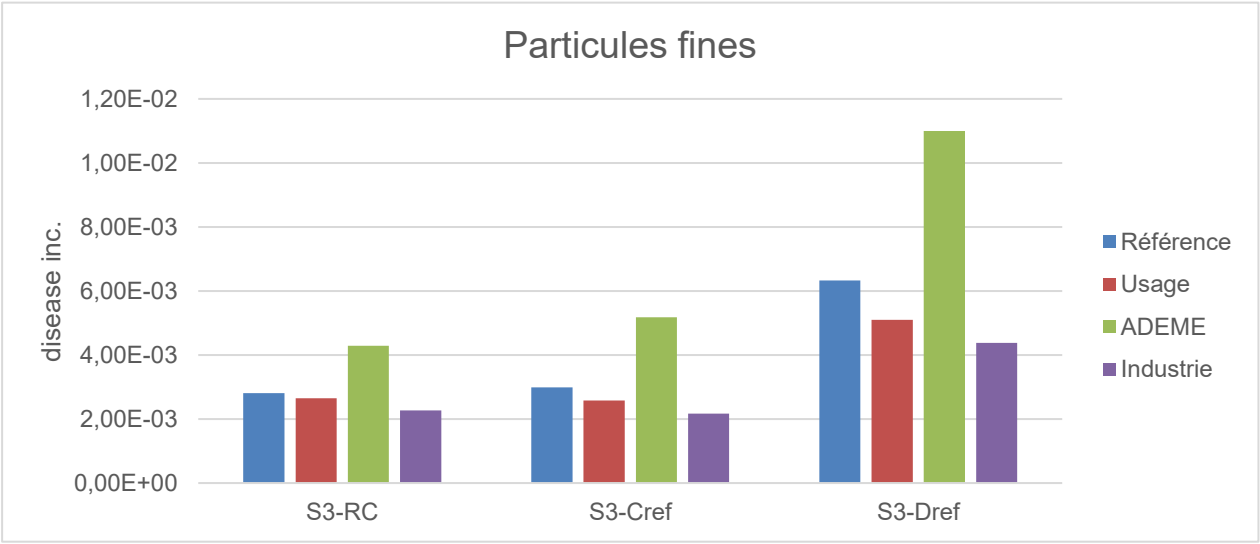


Figure 6-29 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation importante de l'impact (multiplié par 2) avec le mix ADEME pour le scénario avec GF décentralisés S3-Dref qui est le plus grand consommateur d'électricité, et de moindre mesure pour les deux autres scénarios ;

- Diminution non négligeable de l'impact avec le mix Clim/Industrie, principalement pour le scénario S3-Dref ;
- Evolution négligeable sur les autres mix pour les trois scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique, mais plus marqué sur le mix ADEME.

Les conclusions affirmées restent exactes, malgré une évolution importante sur le S3-Dref lors de la modélisation avec le mix ADEME.

6.4.1.4 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

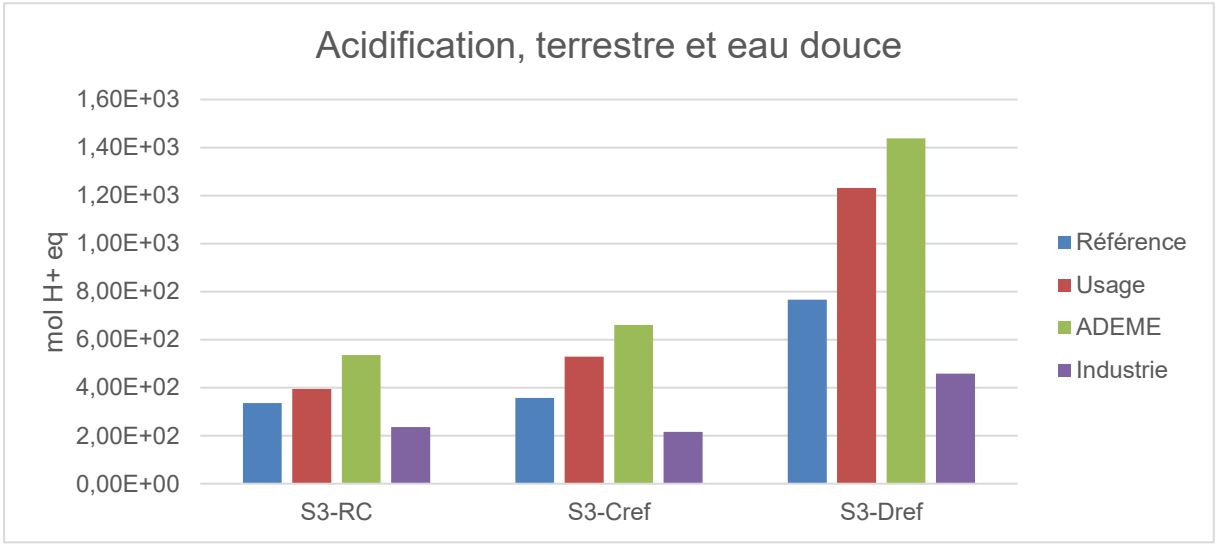


Figure 6-30 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation importante de l'impact avec le mix ADEME pour chaque scénario, dont les GF décentralisés S3-Dref qui est le plus grand consommateur d'électricité, et de moindre mesure pour les deux autres scénarios ;
- Augmentation importante de l'impact avec le mix Usage uniquement sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- Diminution non négligeable de l'impact sur le mix Clim / Industrie pour les trois scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique, mais plus marqué sur le mix Usage.

Les conclusions affirmées restent exactes, malgré une évolution importante sur le S3-Dref lors de la modélisation avec le mix Usage et mix ADEME.

6.4.1.5 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

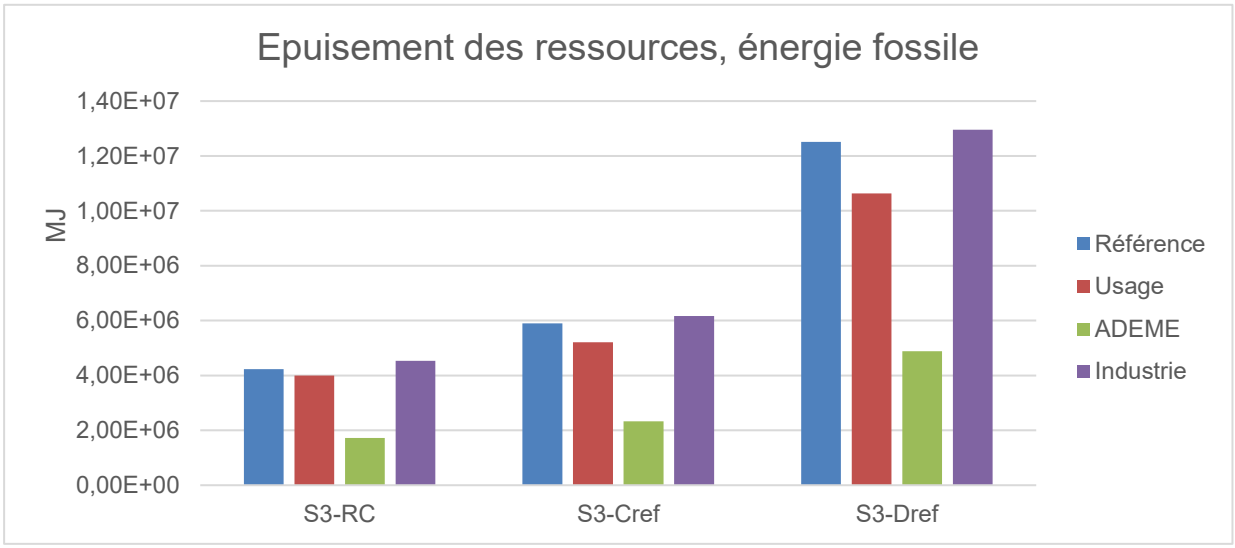


Figure 6-31 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Diminution importante de l'impact avec le mix ADEME pour chaque scénario ;
- Evolution négligeable avec les autres mix pour les trois scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, étant donné une diminution équivalente sur chaque scénario lors de la modélisation avec le mix Usage.

6.4.1.6 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

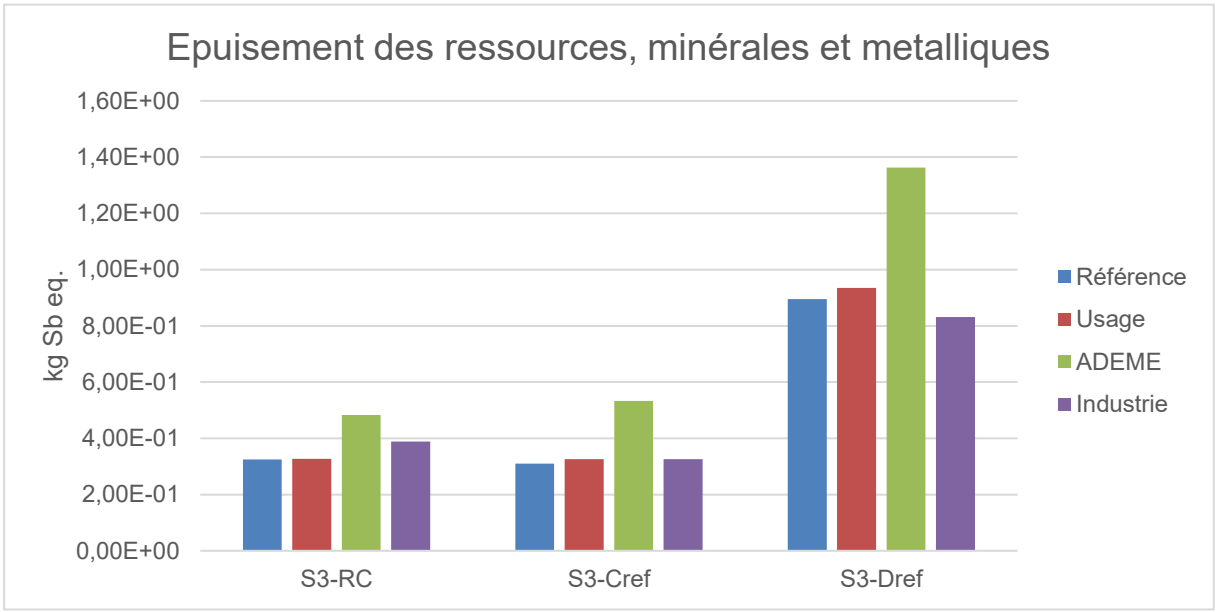


Figure 6-32 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation importante de l'impact avec le mix ADEME pour le scénario avec GF décentralisés S3-Dref qui est le plus grand consommateur d'électricité, et de moindre mesure pour les deux autres scénarios ;
- Evolution négligeable avec les autres mix pour les trois scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique, mais plus marqué sur le mix ADEME.

Les conclusions affirmées restent exactes, malgré une évolution importante sur le S3-Dref lors de la modélisation avec le mix ADEME.

6.4.2 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau dans le circuit secondaire de chaque bâtiment : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle froide 7°C /12°C.

L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 2°C :

- Scénario + 2°C : boucle froide 9°C /14°C
- Scénario - 2°C : boucle froide 5°C /10°C

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant uniquement la température de consigne. Selon la performance thermique d'un bâtiment, sa courbe de demande de chaleur n'est pas la même (par exemple, les bâtiments les mieux isolés ont des besoins de chaleur qui sont plus concentrés sur les périodes les plus froides). Cette analyse de sensibilité est donc une approche simplifiée. Les consommations énergétiques obtenues sont les suivantes :

		Référence	**Froid +2°C**	**Froid -2°C**
Consommation d'électricité des GF à absorption (kWh)	RC	55 025	-	-
	Cref	-	-	-
	Dref	-	-	-
Consommation d'électricité des GF à compression (kWh)	RC	84 897	129 404	150 764
	Cref	398 755	372 267	426 395
	Dref	1 025 470	879 120	1 207 930
COP	RC	EER absorption 0,69 EER compression 5.6	EER absorption 0,75 EER compression 6,0	EER absorption 0,63 EER compression 5.2
	Cref	7,1	7,6	6,7
	Dref	2,6	3,1	2,2

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 3 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-11 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S3-RC			S3-Cref			S3-Dref		
		Référence	+2°C	-2°C	Référence	+2°C	-2°C	Référence	+2°C	-2°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	4,38E+04	4,16E+04	4,32E+04	4,95E+04	4,73E+04	5,18E+04	9,19E+04	7,94E+04	1,08E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	4,03E-02	3,96E-02	4,07E-02	5,78E-02	5,65E-02	5,92E-02	6,87E-02	6,10E-02	7,84E-02
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,85E+05	1,80E+05	1,91E+05	2,64E+05	2,51E+05	2,79E+05	5,70E+05	4,89E+05	6,71E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,20E+02	1,15E+02	1,19E+02	1,24E+02	1,19E+02	1,29E+02	2,38E+02	2,06E+02	2,77E+02
Particules fines	disease inc.	2,81E-03	2,73E-03	2,84E-03	2,99E-03	2,85E-03	3,12E-03	6,30E-03	5,45E-03	7,37E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	1,19E-02	1,18E-02	1,20E-02	1,16E-02	1,13E-02	1,18E-02	2,21E-02	1,98E-02	2,50E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-03	2,12E-03	2,15E-03	1,71E-03	1,67E-03	1,75E-03	4,00E-03	3,46E-03	4,68E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,36E+02	3,24E+02	3,36E+02	3,57E+02	3,41E+02	3,73E+02	7,64E+02	6,61E+02	8,93E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,52E+01	2,46E+01	2,53E+01	2,54E+01	2,46E+01	2,63E+01	5,91E+01	5,23E+01	6,76E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	6,08E+01	5,87E+01	6,08E+01	6,76E+01	6,48E+01	7,04E+01	1,35E+02	1,18E+02	1,56E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	9,70E+02	9,37E+02	9,75E+02	1,04E+03	9,88E+02	1,09E+03	2,11E+03	1,82E+03	2,47E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	4,60E+04	4,54E+04	4,63E+04	4,20E+04	4,09E+04	4,32E+04	9,84E+04	8,61E+04	1,14E+05
Usage des sols	Pt	6,32E+05	6,26E+05	6,58E+05	7,71E+05	7,37E+05	8,07E+05	1,69E+06	1,46E+06	1,99E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,42E+04	4,29E+04	4,54E+04	6,02E+04	5,72E+04	6,33E+04	1,26E+05	1,08E+05	1,48E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	4,24E+06	4,11E+06	4,35E+06	5,90E+06	5,59E+06	6,21E+06	1,25E+07	1,07E+07	1,47E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,24E-01	3,25E-01	3,31E-01	3,10E-01	3,03E-01	3,16E-01	8,94E-01	8,03E-01	1,01E+00

6.4.2.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau.

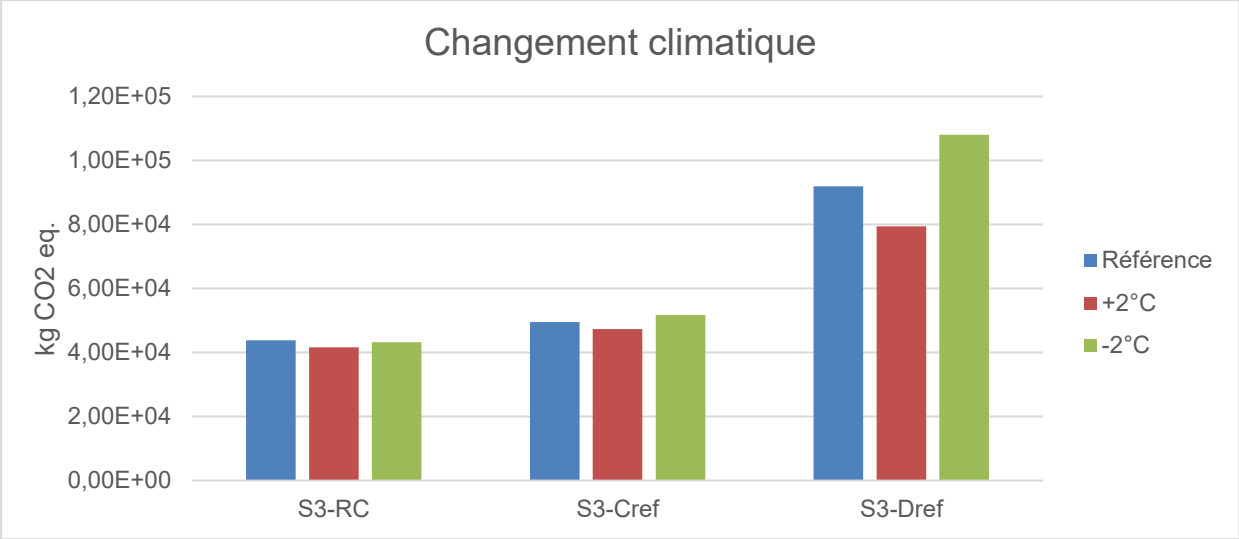


Figure 6-33 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios centralisées S3-RC et S3-Cref ;
- Evolution de 10 % de l'impact sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes. Le système S3-Dref est plus sensible à une modification de la température de consigne que le scénario S3-RC. C'est dû au fait que les écarts de température entre source chaude et source froide sont généralement plus importants pour une PAC air/eau que pour un groupe sur nappe phréatique.

6.4.2.2 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau.

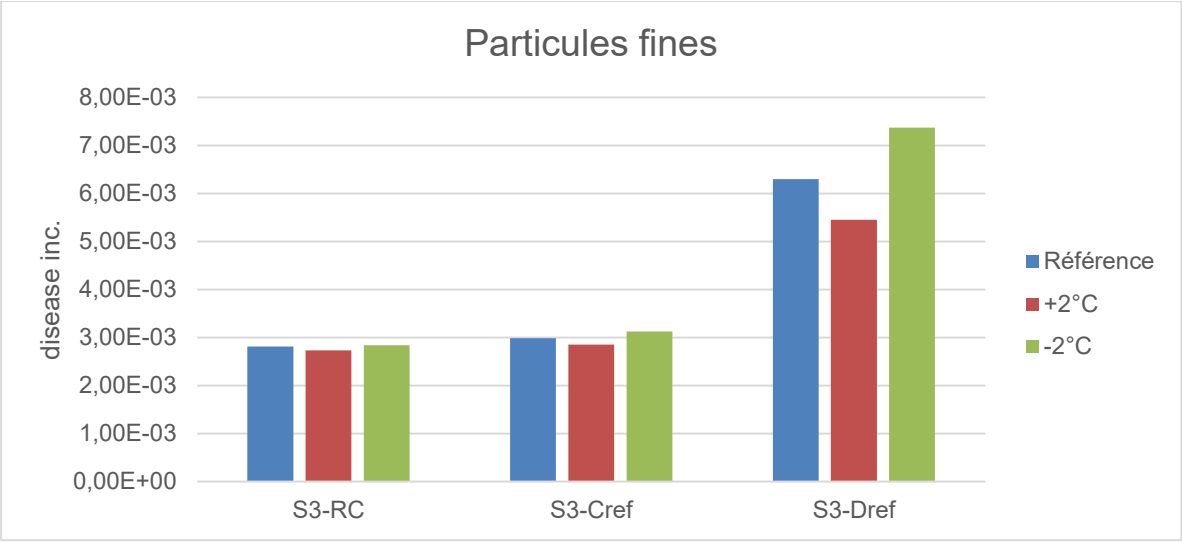


Figure 6-34 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios centralisées S3-RC et S3-Cref ;
- Evolution de 10 % sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.4.2.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau.

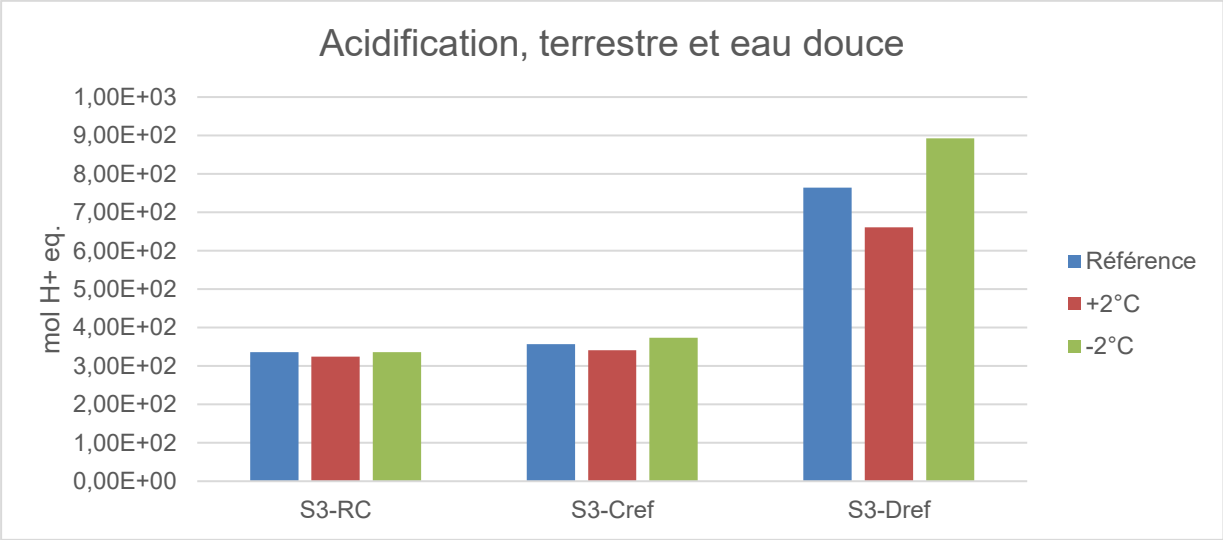


Figure 6-35 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios centralisées S3-RC et S3-Cref ;
- Evolution de 10 % sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;

- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.4.2.4 *Epuisement des ressources énergétiques*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier la température de l'eau.

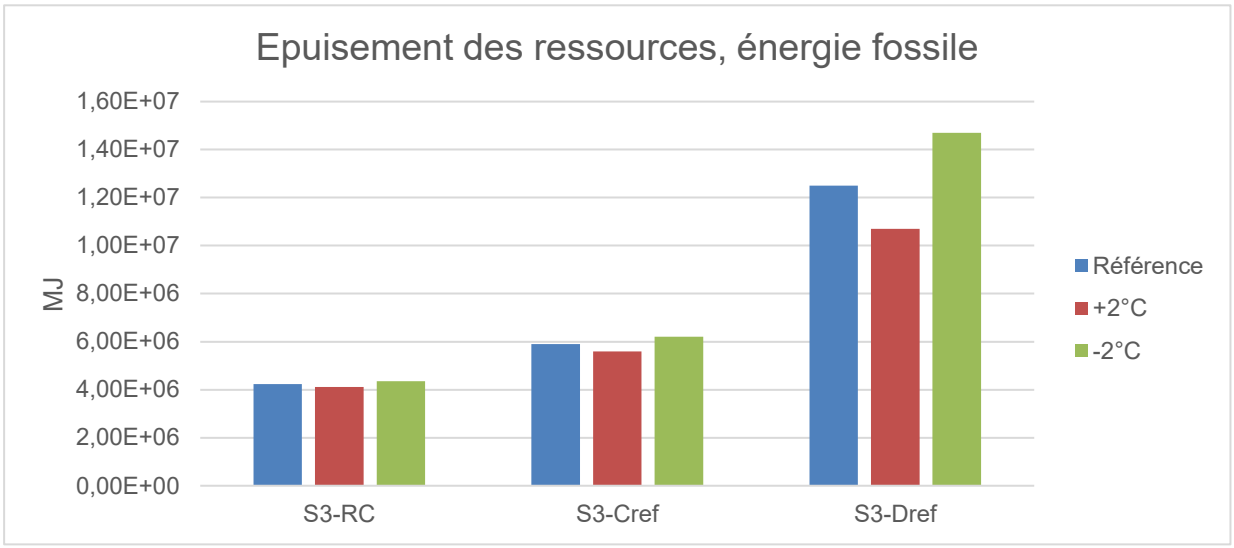


Figure 6-36 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios centralisées S3-RC et S3-Cref ;
- Evolution de 10 % sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.4.2.5 *Epuisement des ressources, minérales et métalliques*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau.

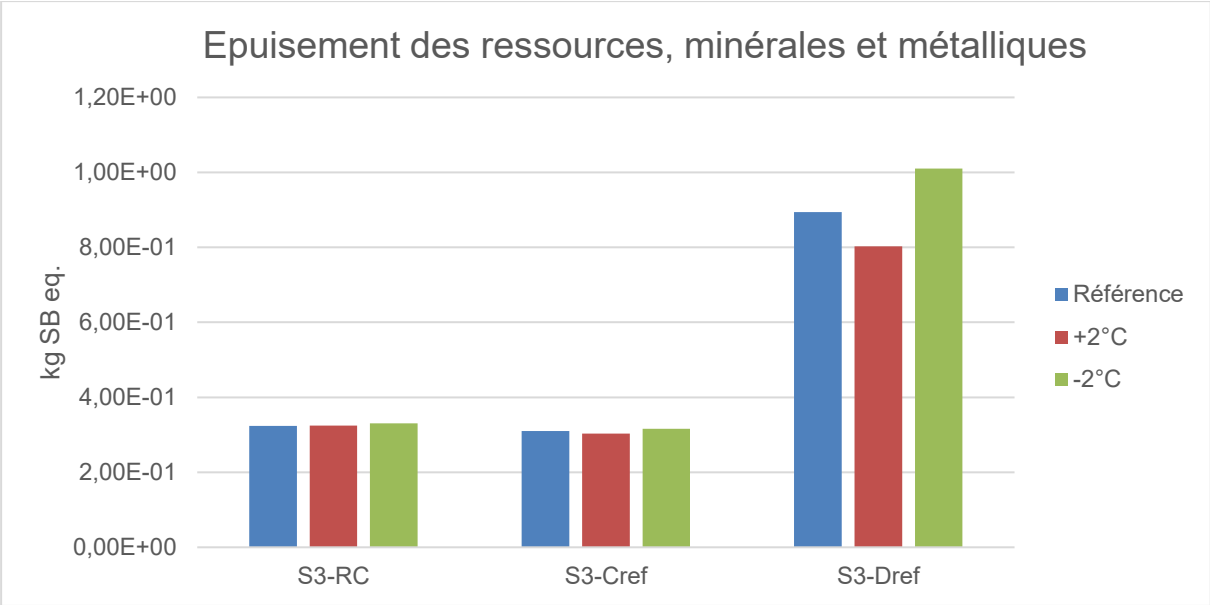


Figure 6-37 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur les scénarios centralisées S3-RC et S3-Cref ;
- Evolution de 10 % sur le scénario avec GF décentralisés S3-Dref ;
- L'impact du scénario de référence se situe entre les deux variations de température ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.4.3 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Le changement de réfrigérant peut impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements, ce qui n'a pas été considéré dans cette analyse de sensibilité. Seule la nature du réfrigérant a été modifiée, en conservant les performances initiales. Dans le cas de l'analyse de sensibilité sur le réfrigérant, seul l'indicateur changement climatique sera étudié car seul le PRG du réfrigérant a été modifié R134-a.

Le tableau suivant fournit l'impact des trois scénarios du cas d'étude 3 concernés par les réfrigérants sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-12 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés

Indicateur	Unité	S3-RC		S3-Cref		S3-Dref	
		Référence	R134a	Référence	R134a	Référence	R134a
Changement climatique	kg CO_2 eq	4,38E+04	7,23E+04	4,95E+04	9,22E+04	9,28E+04	1,79E+05

L'unique indicateur sur lequel la nature du réfrigérant provoque une évolution de l'impact est le changement climatique.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 3 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant.

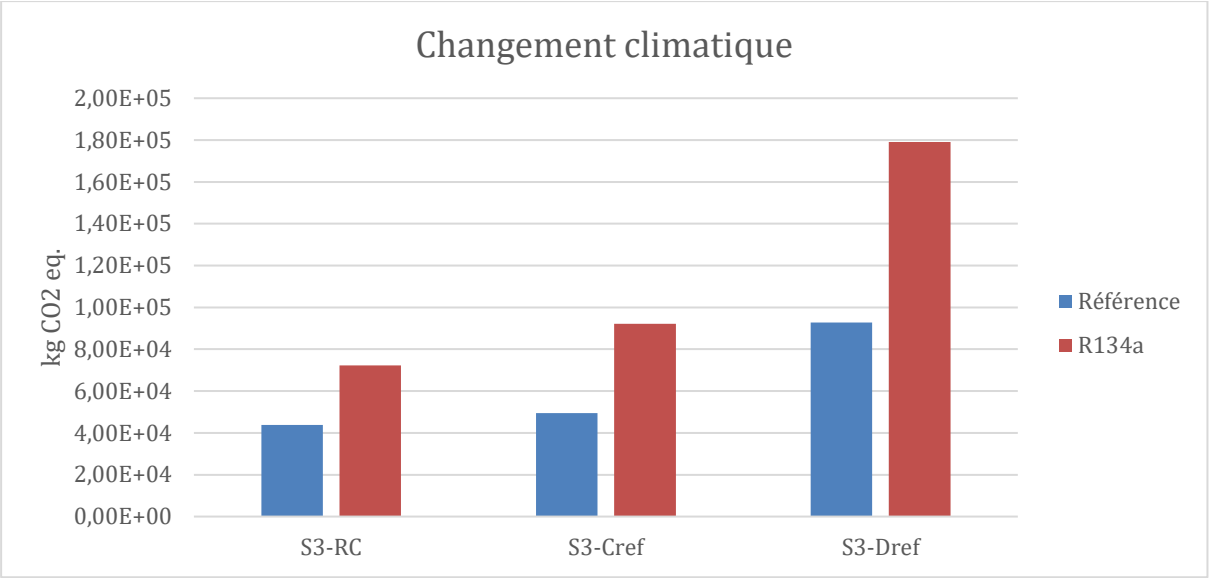


Figure 6-38 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation plus importante de l'impact sur le scénario décentralisé S3-Dref de à une charge initiale proportionnellement légèrement plus importante par rapport à la masse de l'équipement (5%). ;
- L'impact des scénarios avec le réfrigérant de référence est inférieur ;
- Le classement entre les scénarios reste globalement identique

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.4.4 Analyse de sensibilité sur le facteur B de la formule CFF pour le scénario S3-RC

Dans la formule de fin de vie présentée précédemment, un facteur B est introduit pour allouer entre producteur et utilisateur les impacts et crédits de l'incinération. Ce facteur B est égal à 1 dans le rapport, ce qui permet de considérer l'énergie fatale en entrée comme étant gratuite. Cependant, les recommandations de PEF v6.3 à l'échelle européenne, promeuvent un coefficient B égal à 0, se traduisant par des impacts et crédits de l'incinération imputés au producteur de matériau. Dans ce cas, l'énergie issue de l'incinération qui est utilisée par un utilisateur ultérieur doit être comptabilisée comme de l'énergie primaire fossile, ici approximée par du gaz naturel.

Le tableau suivant fournit les résultats des indicateurs midpoints pour le scénario S3-RC. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-13 : Cas d'étude 3 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la valeur du facteur B

Indicateur	Unité	S3-RC		S3-Cref	S3-Dref
		B=1 Référence	B=0	Référence	Référence
Changement climatique	kg CO_2 eq	4,38E+04	8,00E+05	4,95E+04	9,19E+04
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	4,03E-02	8,12E-02	5,78E-02	6,87E-02
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,85E+05	1,94E+05	2,64E+05	5,70E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,20E+02	4,15E+02	1,24E+02	2,38E+02

Particules fines	disease inc.	2,81E-03	4,19E-03	2,99E-03	6,30E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	1,19E-02	1,36E-02	1,16E-02	2,21E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-03	2,45E-03	1,71E-03	4,00E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	3,36E+02	5,89E+02	3,57E+02	7,64E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	2,52E+01	2,73E+01	2,54E+01	5,91E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	6,08E+01	1,46E+02	6,76E+01	1,35E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	9,70E+02	1,91E+03	1,04E+03	2,11E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	4,60E+04	5,22E+04	4,20E+04	9,84E+04
Usage des sols	Pt	6,32E+05	6,81E+05	7,71E+05	1,69E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,42E+04	4,75E+04	6,02E+04	1,26E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	4,24E+06	8,01E+06	5,90E+06	1,25E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,24E-01	3,39E-01	3,10E-01	8,94E-01

6.4.4.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le facteur B.

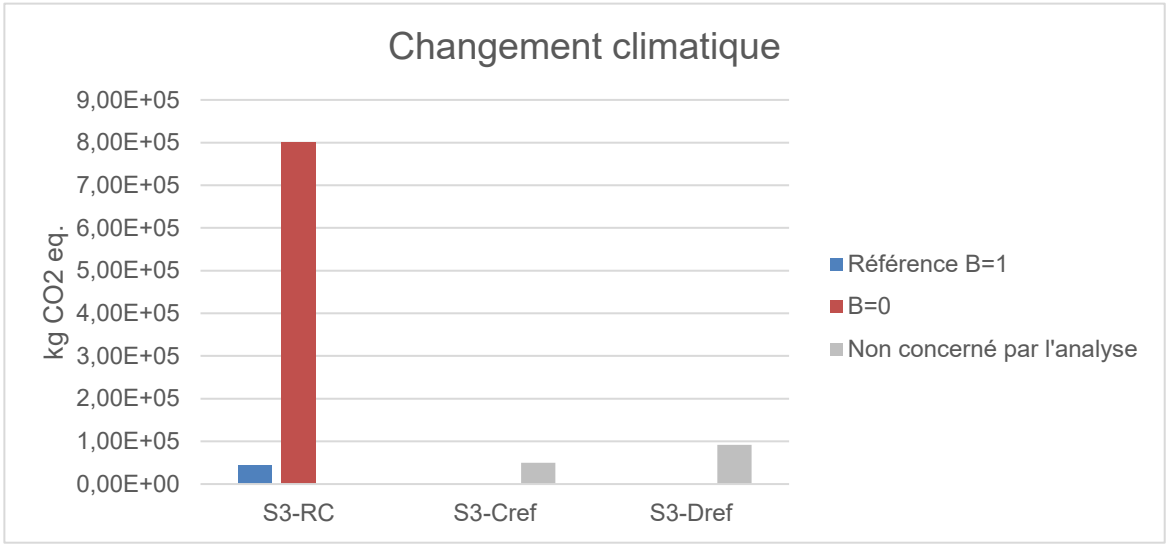


Figure 6-39 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur le changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S3-RC devient 18 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1. En effet, dans un cas nous avons considéré une énergie gratuite (B=1), tandis que dans l'autre (B=0), nous devons prendre en compte une utilisation théorique de gaz naturel ;
- Cette consommation entraîne des émissions de CO_2 due à la combustion du gaz naturel.

Le choix de la valeur de B modifie la hiérarchisation entre les scénarios. Une valeur B=0 rend le scénario S3-Créf plus intéressant en termes de réchauffement climatique que le scénario S3-RC.

6.4.4.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le facteur B.

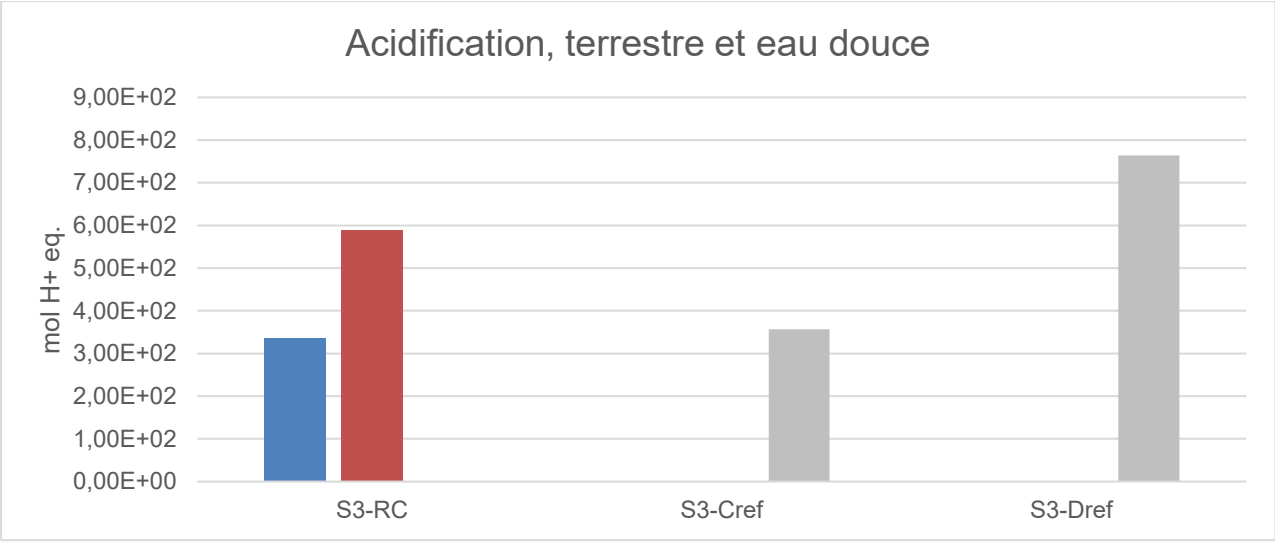


Figure 6-40 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S3-RC devient 2 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1. Cela est due aux émissions directes de NOx lors de la combustion et de la phase de production.

Le choix de la valeur de B peut modifier les conclusions entre deux scénarios : si B=0, le scénario S3-RC a des impacts plus importants que le S3-Cref.

6.4.4.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le facteur B.

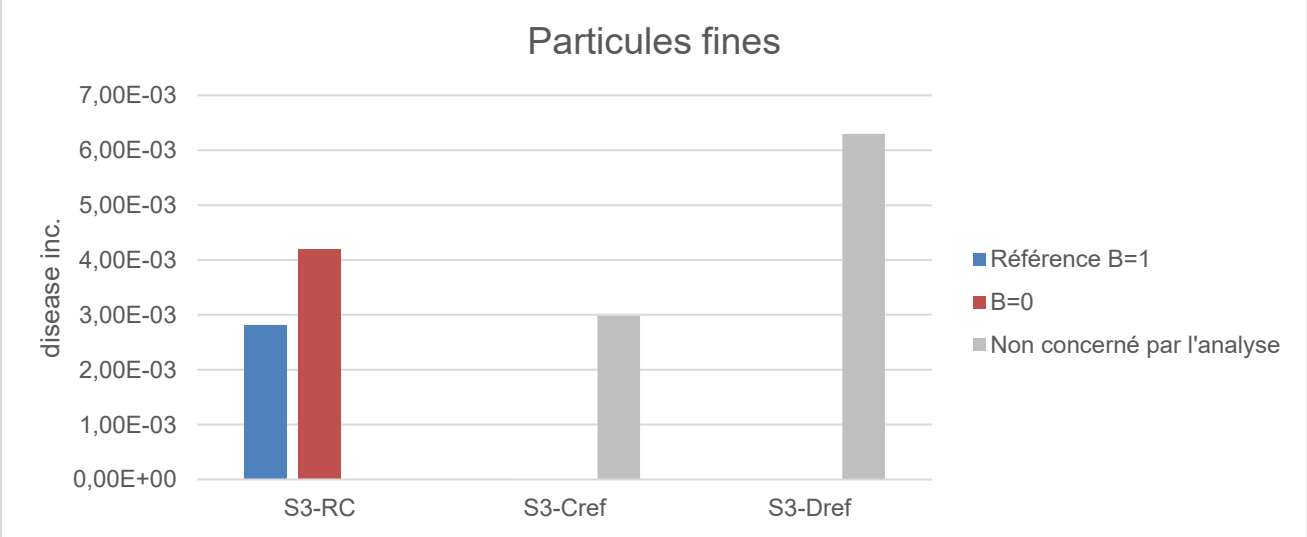


Figure 6-41 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur les particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S3-RC devient plus impactant par rapport à une valeur B=1 à cause des émissions particules lors de la combustion du gaz naturel.

Le choix de la valeur de B peut modifier les conclusions entre deux scénarios : si B=0, le scénario S3-RC a des impacts plus importants que le S3-Cref.

6.4.4.4 *Toxicité humaine, effets non-cancérogènes*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de toxicité humaine (effets cancérogènes) en faisant varier le facteur B.

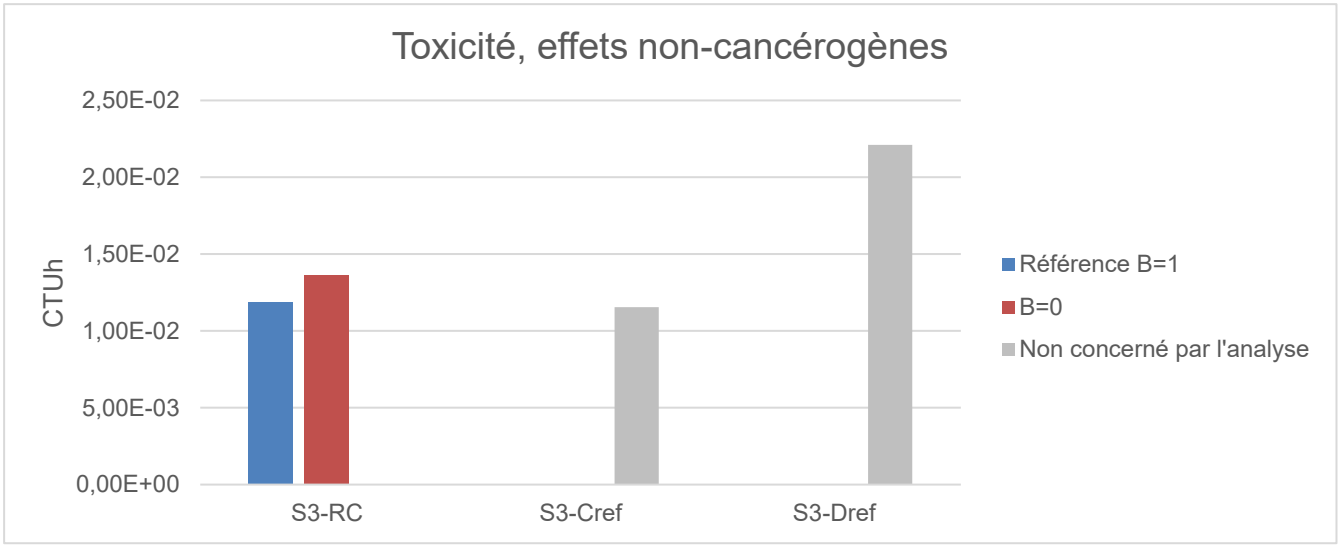


Figure 6-42 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur la toxicité humaine, effets non-cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S3-RC devient légèrement plus impactant par rapport à une valeur B=1

Le choix de la valeur de B ne modifie pas les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, le scénario S3-Cref présente toujours de meilleurs résultats (ou équivalant vis-à-vis des incertitudes) que le scénario S3-Cref.

6.4.4.5 *Epuisement des ressources énergétiques*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le facteur B.

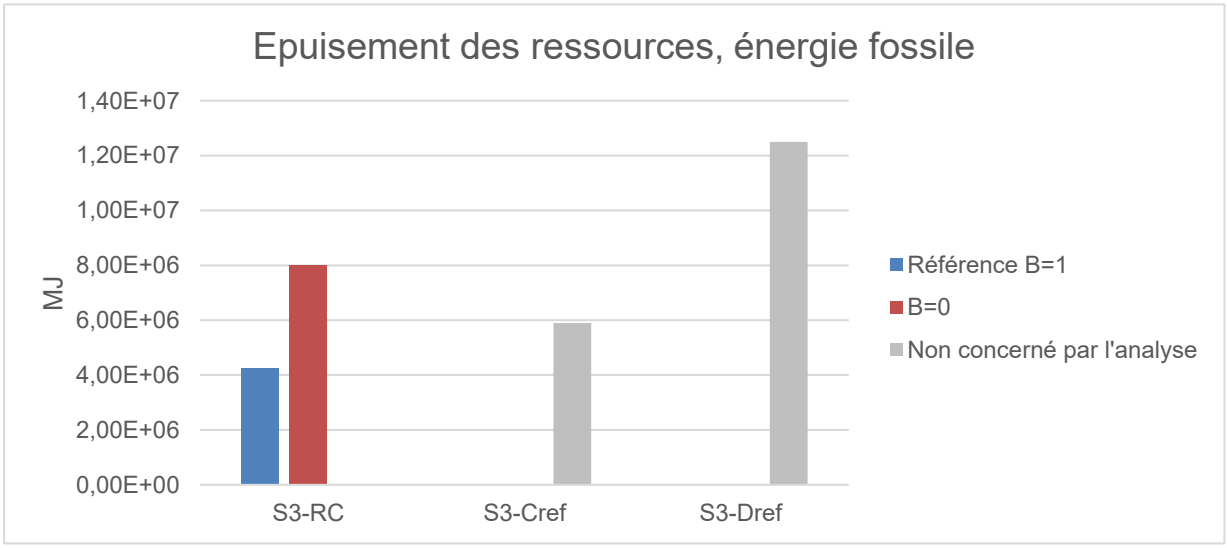


Figure 6-43 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S3-RC devient deux fois plus impactant par rapport à une valeur B=1 à cause de l'utilisation de gaz naturel.

Le choix de la valeur de B peut modifier les conclusions entre deux scénarios : si B=0, le scénario S3-RC a des impacts plus importants que le S3-Cref.

6.4.4.6 Epuisement des ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier le facteur B.

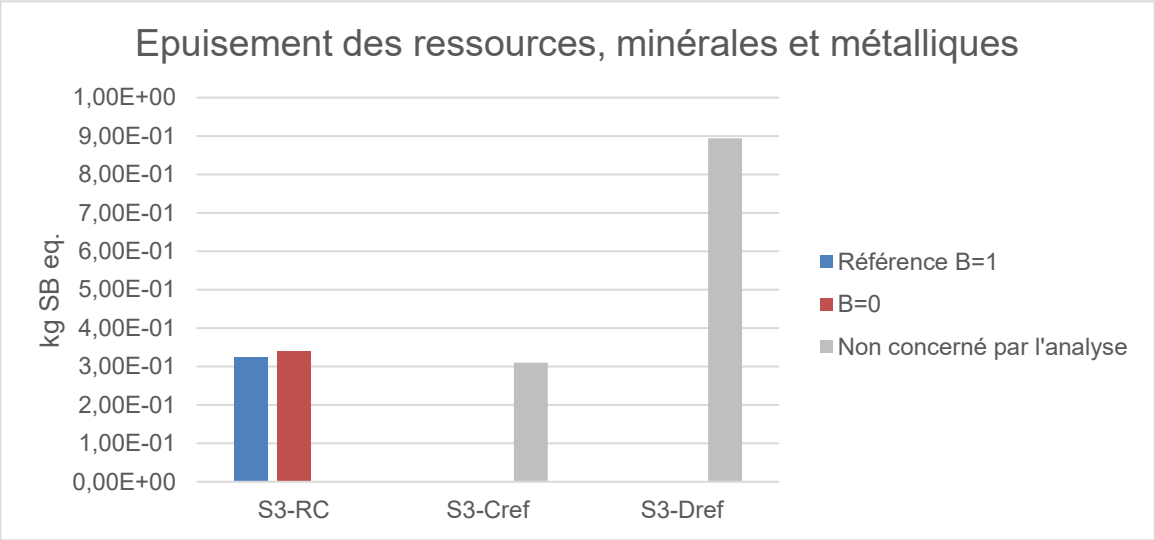


Figure 6-44 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, les trois garde les mêmes impacts par rapport à une valeur B=1.

Le choix de la valeur de B ne modifie pas les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, le scénario S3-Cref présente toujours de meilleurs résultats que le scénario S3-Cref.

6.4.5 Conclusions sur les analyses de sensibilités du cas d'étude 3

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 3 est présentée dans le tableau suivant. Quatre analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 3, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-14 : Cas d'étude 3 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Paramètre B (uniquement dans S3-RC)	Nature du réfrigérant	Température de l'eau approvisionnée
	Usage	ADEME	Clim.			
Changement climatique						
Acidification terrestre et d'eau douce						
Particules fines						
Toxicité humaine non-cancérogène						
Epuisement des ressources énergétiques						
Epuisement des ressources minérales et métalliques						

Les analyses de sensibilité dans le scénario 3 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée. Le scénario S3-Dréf a une consommation électrique plus importante que les scénarios S3-RC et S3-Cref et le fait de modifier le mix n'entraîne pas de basculement entre les scénarios.

- **Facteur B** : la valeur du facteur B dans le scénario S3-RC est un choix méthodologique important pour définir la hiérarchie entre les scénarios S3-RC et S3-Cref. Dans le cas de référence, pour considérer une énergie fatale gratuite comme convenu avec l'ADEME, une valeur de B=1 est considérée. Cependant, la Commission Européenne préconise une valeur de B=0 qui a donc servi comme analyse de sensibilité. Cette valeur inverse la tendance entre les 2 scénarios pour l'indicateur de réchauffement climatique : le scénario S3-RC devient 18 fois plus impactant que le scénario S3-Créf. Nous retrouvons également un changement du classement entre ces deux scénarios sur les indicateurs d'acidification, de particules fines et d'épuisement des ressources énergétiques. La valeur par défaut de B est toujours en cours de discussion au niveau Européen et structurera la considération des sources d'énergie fatale.

- **Nature du réfrigérant** : une modification de la nature du réfrigérant engendre une augmentation des impacts plus importants sur le scénario décentralisé S3-Dref. Le classement entre les scénarios reste cependant globalement identique.

- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas la hiérarchie entre les scénarios. Le scénario avec GF décentralisés S3-Dref y est plus sensible mais cela ne remet pas en cause la hiérarchie observée en analyse de contributions.

6.5 Cas d'étude 4

Pour le cas d'étude 4, différentes analyses de sensibilités ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix par usage « climatisation » issue du mix industrie du référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs ;
- Le taux de couverture solaire : le niveau de dimensionnement amenant à des taux de couverture solaire différent pour un même ensoleillement
- Le taux de recyclage des panneaux solaires

6.5.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 4 scénarios du cas d'étude 4 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-15 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S4-RC				S4-Cref				S4-Dref1				S4-Dref2			
		Réf.	Usage	ADEME	Industrie	Réf.	Usage	ADEME	Industrie	Réf.	Usage	ADEME	Industrie	Réf.	Usage	ADEME	Industrie
Changement climatique	kg CO_2 eq	3,16E+05	3,16E+05	3,11E+05	3,10E+05	1,30E+06	1,30E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	1,45E+06	9,61E+05	9,61E+05	9,61E+05	9,61E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	5,75E-02	5,75E-02	5,30E-02	5,75E-02	2,24E-01	2,24E-01	2,20E-01	2,25E-01	2,30E-01	2,30E-01	2,30E-01	2,30E-01	1,56E-01	1,56E-01	1,56E-01	1,56E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,70E+05	1,70E+05	1,20E+05	1,83E+05	8,02E+04	8,02E+04	3,10E+04	9,26E+04	2,81E+03	2,81E+03	2,81E+03	2,81E+03	8,41E+03	8,41E+03	8,41E+03	8,41E+03
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,08E+02	6,08E+02	5,97E+02	6,02E+02	1,07E+03	1,07E+03	1,06E+03	1,06E+03	1,11E+03	1,11E+03	1,11E+03	1,11E+03	8,33E+02	8,33E+02	8,33E+02	8,33E+02
Particules fines	disease inc.	9,31E-03	9,31E-03	9,94E-03	9,11E-03	4,79E-03	4,79E-03	5,40E-03	4,59E-03	3,70E-03	3,70E-03	3,70E-03	3,70E-03	4,18E-03	4,18E-03	4,18E-03	4,18E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,91E-02	7,91E-02	7,93E-02	8,03E-02	1,55E-02	1,55E-02	1,57E-02	1,67E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	2,01E-02	2,01E-02	2,01E-02	2,01E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-02	2,14E-02	2,15E-02	2,18E-02	3,89E-03	3,89E-03	4,00E-03	4,21E-03	2,11E-03	2,11E-03	2,11E-03	2,11E-03	4,34E-03	4,34E-03	4,34E-03	4,34E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	9,37E+02	9,37E+02	1,02E+03	8,93E+02	1,07E+03	1,07E+03	1,15E+03	1,03E+03	9,51E+02	9,51E+02	9,51E+02	9,51E+02	8,19E+02	8,19E+02	8,19E+02	8,19E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,94E+01	6,94E+01	6,73E+01	6,97E+01	1,94E+01	1,94E+01	1,73E+01	1,97E+01	1,28E+01	1,28E+01	1,28E+01	1,28E+01	2,96E+01	2,96E+01	2,96E+01	2,96E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,12E+02	2,12E+02	2,08E+02	2,10E+02	2,93E+02	2,93E+02	2,89E+02	2,91E+02	2,59E+02	2,59E+02	2,59E+02	2,59E+02	2,18E+02	2,18E+02	2,18E+02	2,18E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	2,48E+03	2,48E+03	2,92E+03	2,29E+03	3,31E+03	3,31E+03	3,74E+03	3,12E+03	2,82E+03	2,82E+03	2,82E+03	2,82E+03	2,25E+03	2,25E+03	2,25E+03	2,25E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,13E+05	3,13E+05	3,14E+05	3,19E+05	6,86E+04	6,86E+04	6,92E+04	7,39E+04	4,30E+04	4,30E+04	4,30E+04	4,30E+04	7,89E+04	7,89E+04	7,89E+04	7,89E+04
Usage des sols	Pt	2,63E+06	2,63E+06	2,76E+06	2,97E+06	5,37E+05	5,37E+05	6,60E+05	8,68E+05	2,66E+05	2,66E+05	2,66E+05	2,66E+05	7,47E+05	7,47E+05	7,47E+05	7,47E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	6,67E+04	6,67E+04	5,83E+04	6,81E+04	2,84E+04	2,84E+04	2,01E+04	2,97E+04	1,09E+04	1,09E+04	1,09E+04	1,09E+04	3,19E+04	3,19E+04	3,19E+04	3,19E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	7,70E+06	7,70E+06	6,62E+06	7,87E+06	2,12E+07	2,12E+07	2,01E+07	2,13E+07	2,06E+07	2,06E+07	2,06E+07	2,06E+07	1,38E+07	1,38E+07	1,38E+07	1,38E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	7,33E-01	7,33E-01	8,04E-01	7,85E-01	2,22E-01	2,22E-01	2,91E-01	2,73E-01	1,92E-01	1,92E-01	1,92E-01	1,92E-01	3,89E-01	3,89E-01	3,89E-01	3,89E-01

6.5.1.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

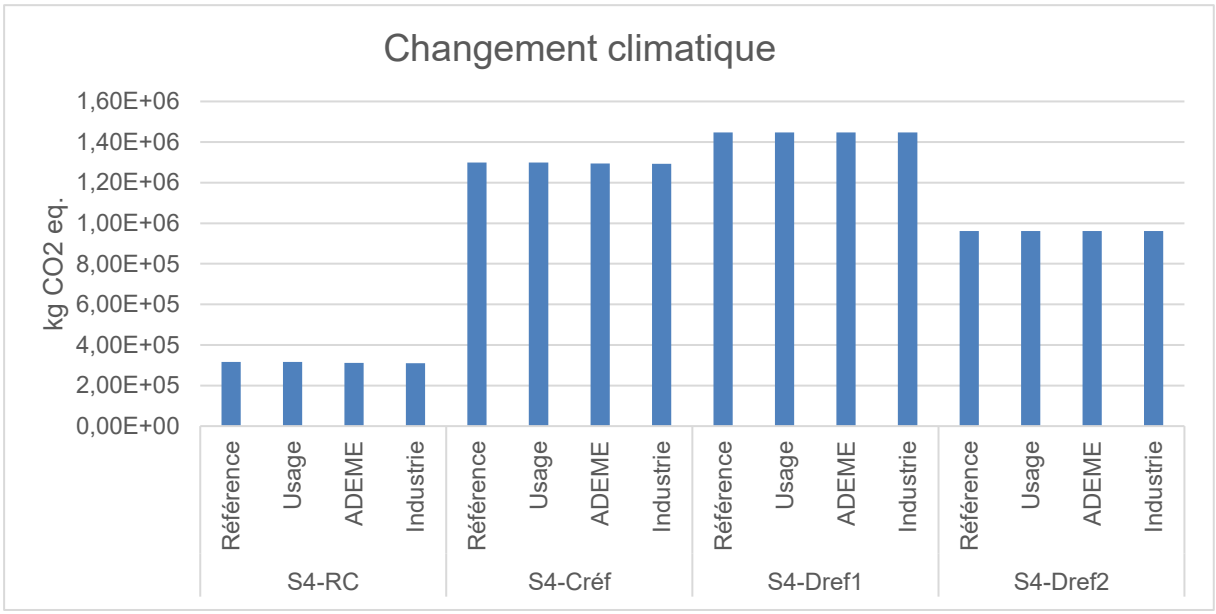


Figure 6-45 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Aucune évolution significative sur aucun scénario ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.1.2 *Toxicité humaine, effets cancérogènes*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes en faisant varier le mix électrique.

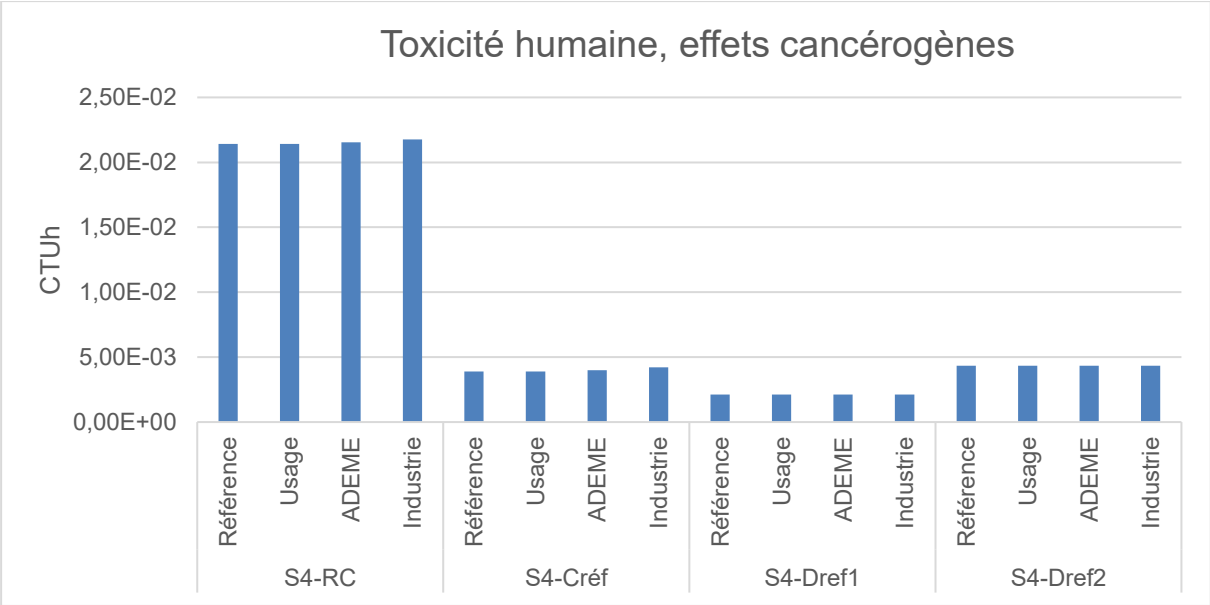


Figure 6-46 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Aucune évolution significative sur aucun scénario ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.1.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

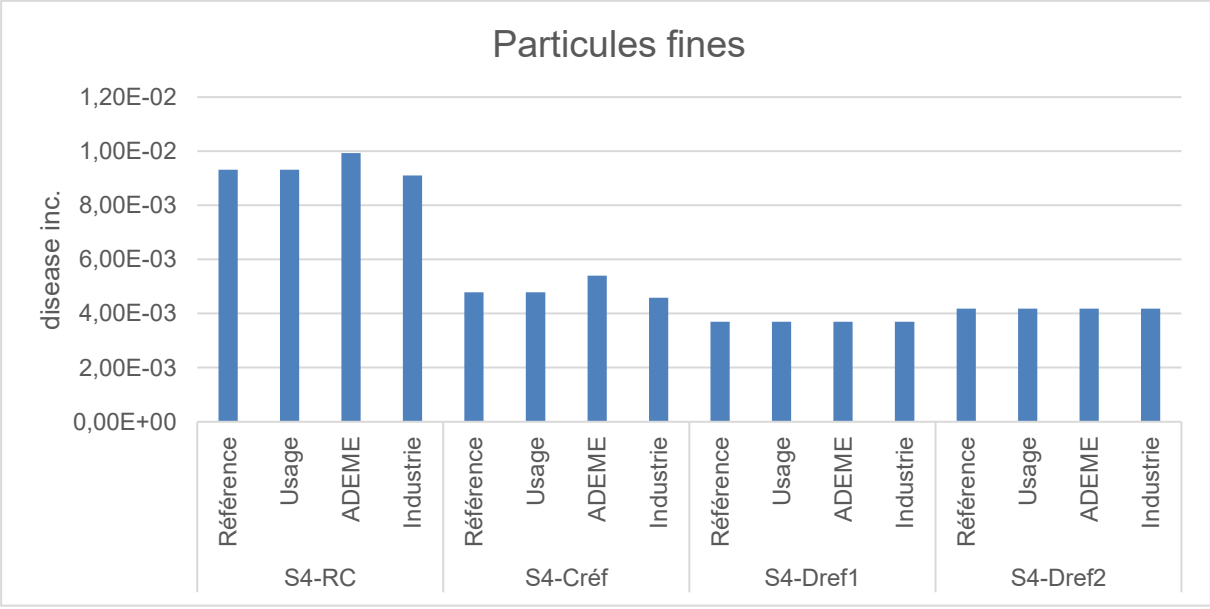


Figure 6-47 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-Cref augmente de 13% avec le mix ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.1.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

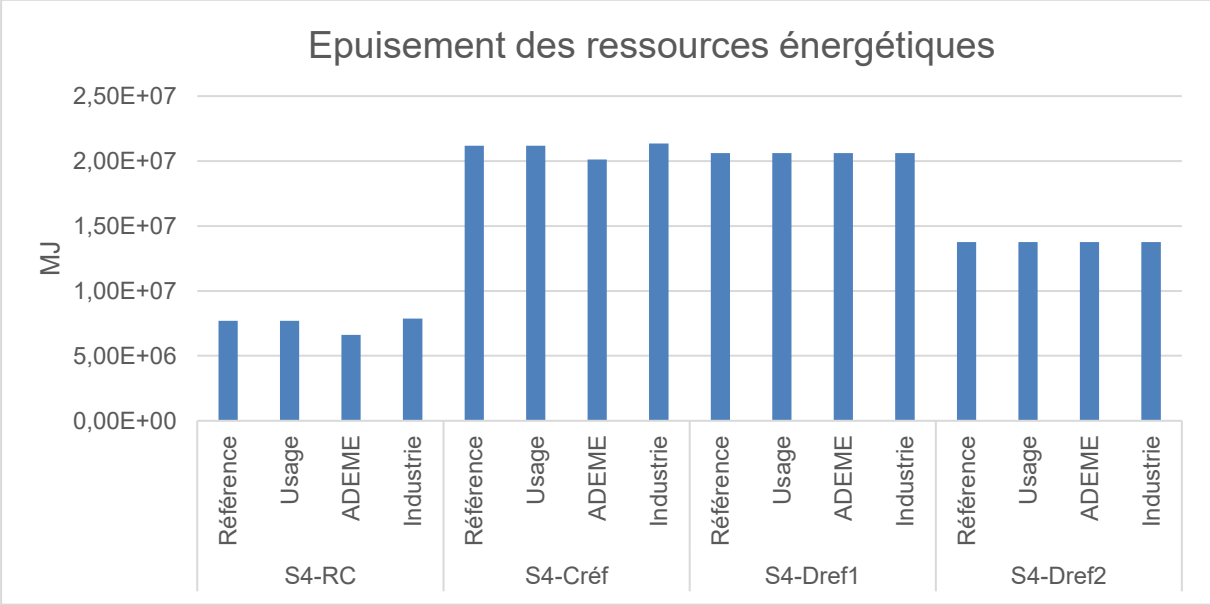


Figure 6-48 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC diminue de 14% avec le mix ADEME ;
- Dans le cas du mix ADEME, le scénario S4-Cref a un impact moindre que le scénario S4-Dref 1 bien que la hiérarchie ne puisse être totalement établie au regard des incertitudes ;
- Le classement entre les scénarios reste inchangé avec une nuance supplémentaire apportée à l'ordre entre S4-Cref et S4-Dref1.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.1.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

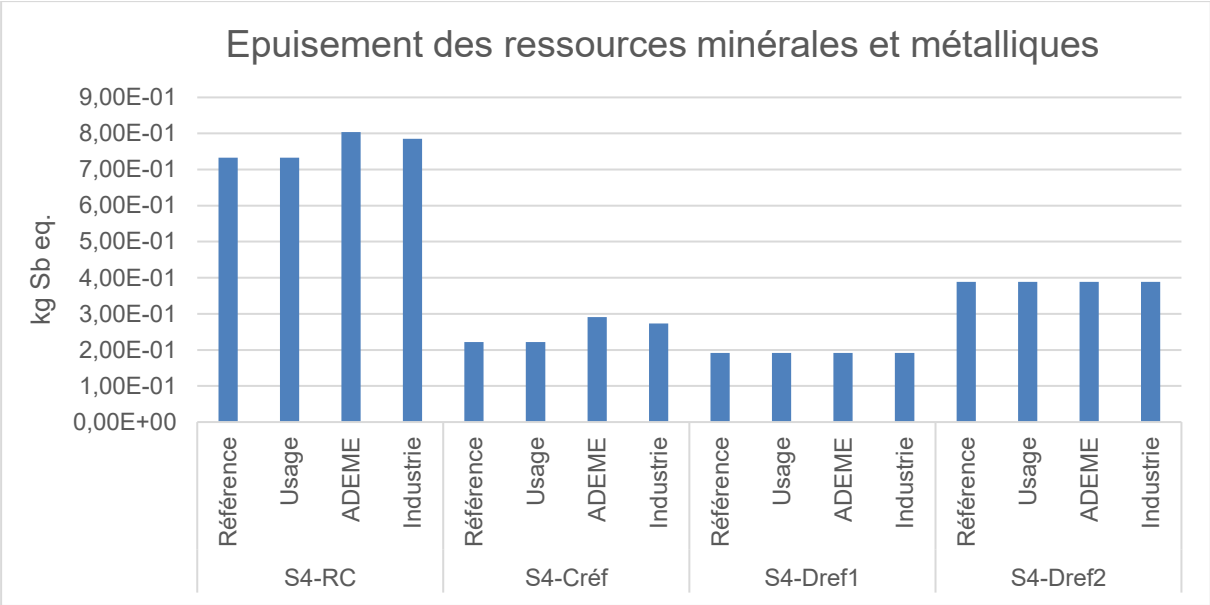


Figure 6-49 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-Cref est plus sensible à la modification du mix électrique que S4-Dréf1 : il augmente de 31% avec le mix ADEME et de 23% avec le mix Industrie. Il reste cependant plus performant que le scénario S4-RC ;
- La hiérarchie entre les scénarios S4-Créf et S4-Dréf 1 devient plus tranchée avec un avantage pour S4-Dréf1.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.2 Analyse de sensibilité sur le taux de couverture solaire

Le taux de couverture solaire est modifié selon le dimensionnement du système pour un même ensoleillement. L'analyse de sensibilité porte sur deux variantes :

- Une variante surdimensionnée : un taux de couverture de 94% est considéré qui correspond au modèle « brut » de Drake Landing adapté aux conditions françaises, sans redimensionnement du ratio nombre de sondes / nombre de panneaux. Cela amène à 754 panneaux solaires de 16 m² et 778 sondes de 60m.
- Une variante sous-dimensionnée : un taux de couverture moindre, de 70%, correspondant dans nos estimations précédentes à 226 panneaux solaires de 16 m² et 232 sondes.

Ces deux variantes sont comparées au modèle de référence qui dispose d'une couverture solaire de 90%.

Les consommations de gaz, d'électricité des différentes pompes, de longueur des circuits (comme les raccordements entre les pompes) ainsi que les masses des différents constituants ont été également adaptées en fonction.

Tableau 6-16 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité de la couverture solaire sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S4-RC			S4-Créf	S4-Dref1	S4-Dref2
		Référence	Couverture totale à 94% (surestimé)	Couverture totale à 70%			
Changement climatique	kg CO_2 eq	3,15E+05	2,83E+05	8,23E+05	1,30E+06	1,45E+06	9,61E+05

Indicateur	Unité	S4-RC			S4-Créf	S4-Dref1	S4-Dref2
		Référence	Couverture totale à 94% (surestimé)	Couverture totale à 70%			
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	5,74E-02	5,07E-02	1,42E-01	2,24E-01	2,30E-01	1,56E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,70E+05	1,73E+05	1,43E+05	8,02E+04	2,81E+03	8,41E+03
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,01E+02	6,63E+02	8,99E+02	1,07E+03	1,11E+03	8,33E+02
Particules fines	disease inc.	9,15E-03	1,10E-02	8,74E-03	4,79E-03	3,70E-03	4,18E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,92E-02	9,73E-02	6,75E-02	1,55E-02	1,00E-02	2,01E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-02	2,66E-02	1,80E-02	3,89E-03	2,11E-03	4,34E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	9,21E+02	1,05E+03	1,14E+03	1,07E+03	9,51E+02	8,19E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,84E+01	8,24E+01	6,13E+01	1,94E+01	1,28E+01	2,96E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,09E+02	2,35E+02	2,77E+02	2,93E+02	2,59E+02	2,18E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	2,46E+03	2,73E+03	3,14E+03	3,31E+03	2,82E+03	2,25E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,12E+05	3,85E+05	2,69E+05	6,86E+04	4,30E+04	7,89E+04
Usage des sols	Pt	2,65E+06	3,49E+06	1,93E+06	5,37E+05	2,66E+05	7,47E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	6,66E+04	7,41E+04	5,94E+04	2,84E+04	1,09E+04	3,19E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	7,69E+06	7,17E+06	1,49E+07	2,12E+07	2,06E+07	1,38E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	7,02E-01	8,40E-01	6,85E-01	2,22E-01	1,92E-01	3,89E-01

6.5.2.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la couverture solaire du scénario de référence (S4-RC).

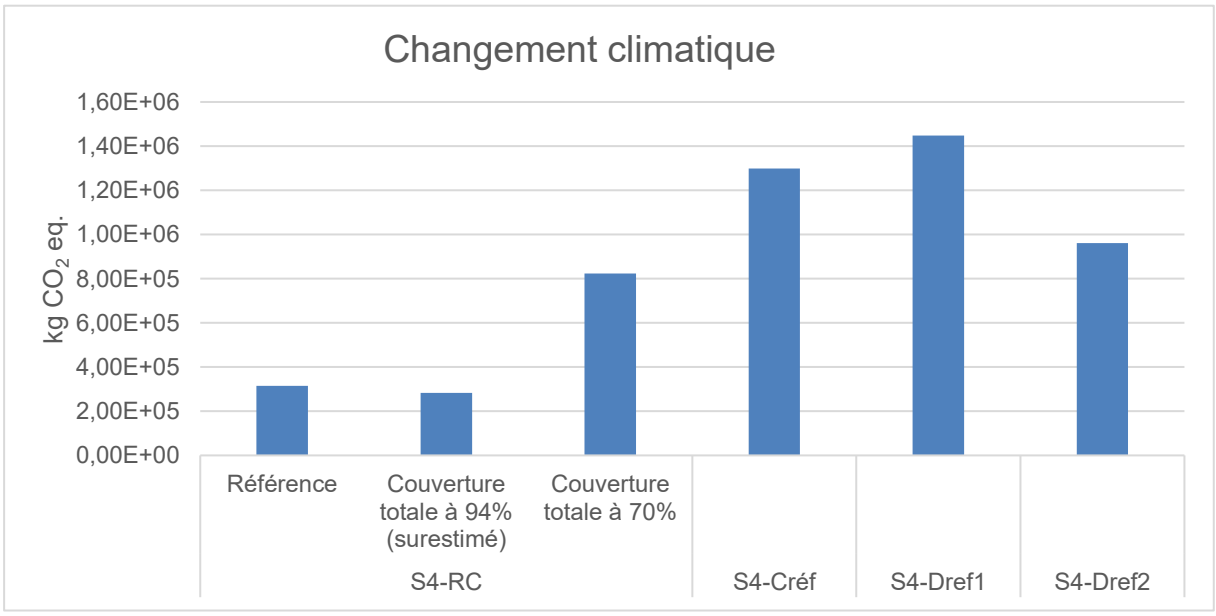


Figure 6-50 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 1,7 fois avec la couverture solaire dégradée à 70% ;
- Dans le cas de la couverture solaire dégradée, le scénario S4-RC a une performance similaire au scénario S4-Dref2 ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence avec une nuance apportée à l'ordre entre S4-RC et S4-Dref2.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.2.2 *Toxicité humaine, effets cancérogènes*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes en faisant varier la couverture solaire du scénario de référence (S4-RC).

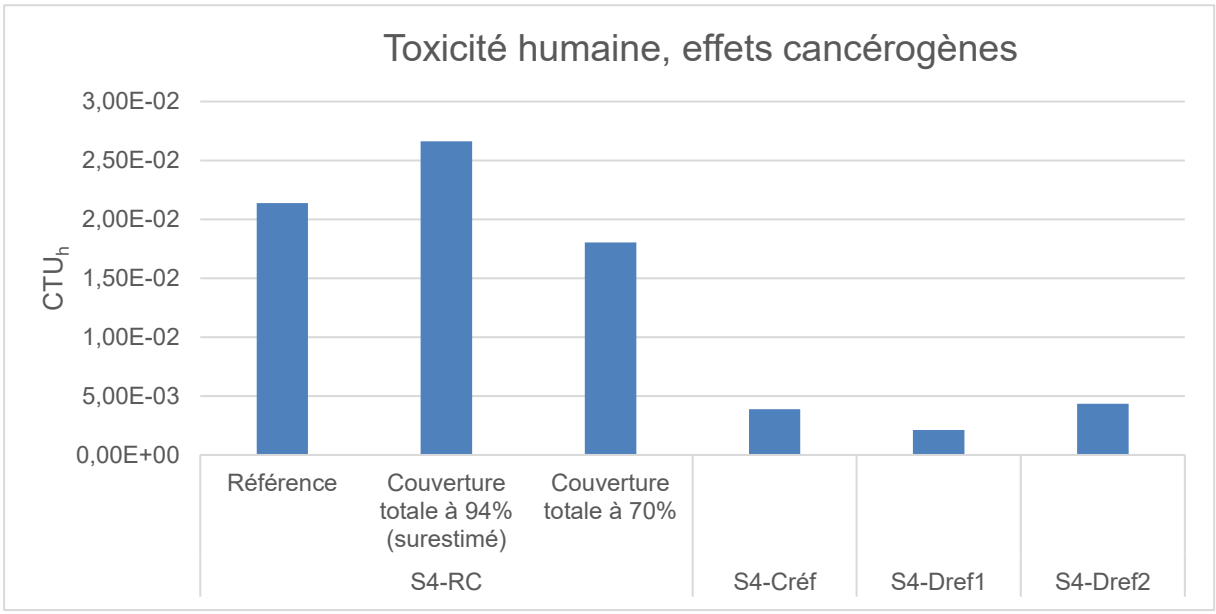


Figure 6-51 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 27% avec le scénario solaire surestimé permettant d'atteindre une couverture solaire de 94% et diminue de 17% avec le scénario à taux de couverture solaire dégradé ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.2.3 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la couverture solaire du scénario de référence (S4-RC).

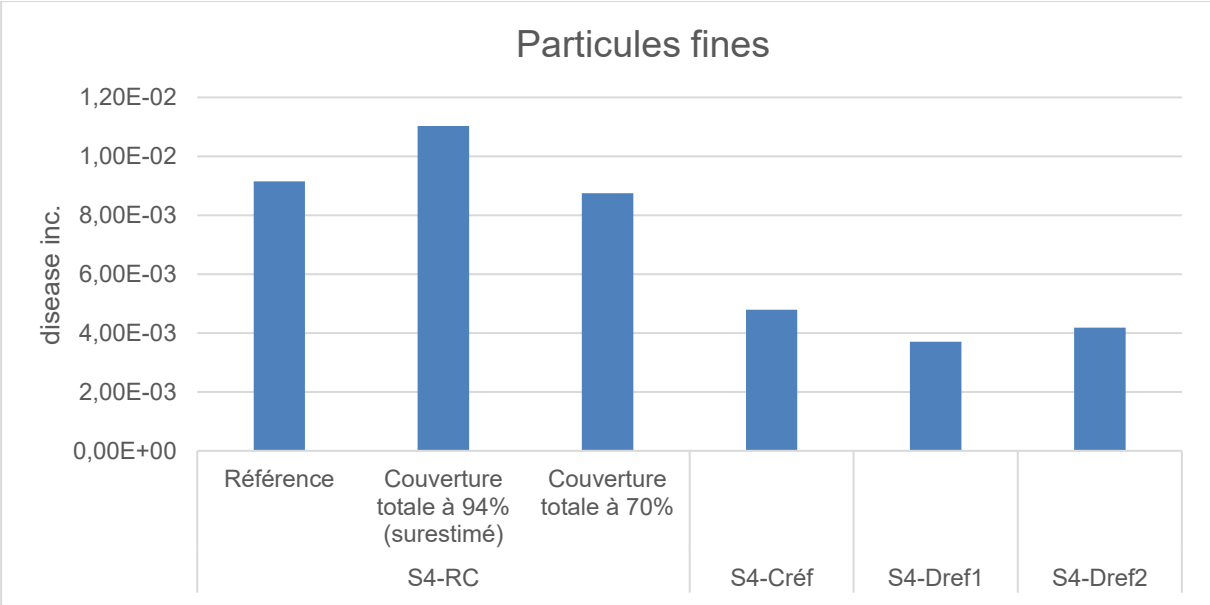


Figure 6-52 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 22% avec le scénario solaire surestimé permettant d'atteindre une couverture solaire de 94% ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.2.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de ressources énergétiques en faisant varier la couverture solaire du scénario de référence (S4-RC).

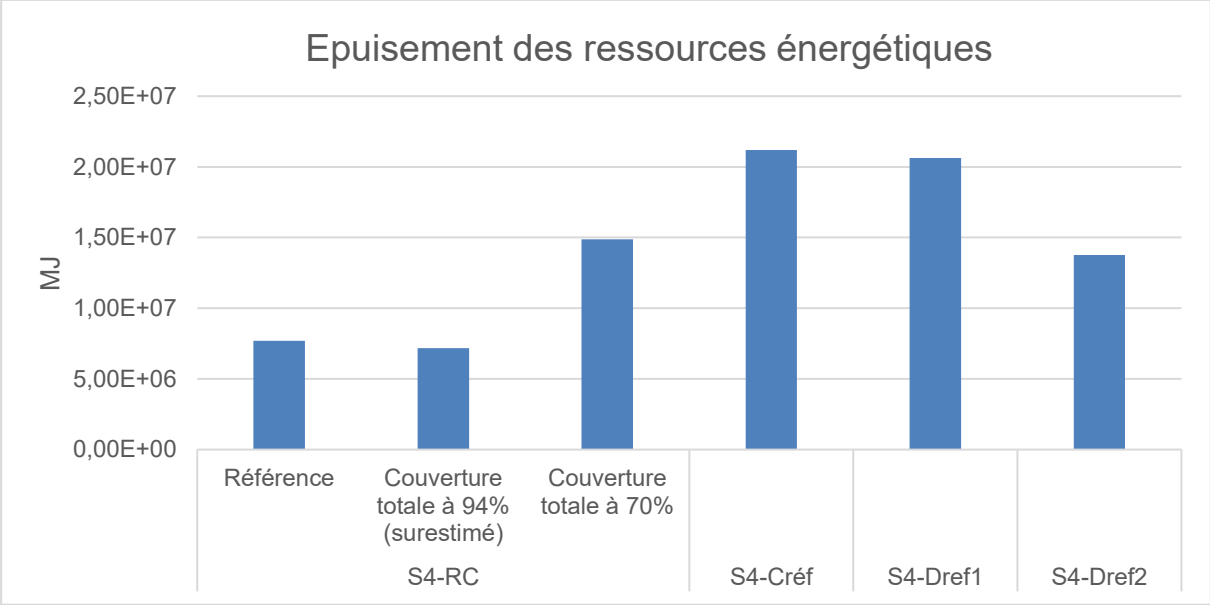


Figure 6-53 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 95% avec la dégradation de la couverture solaire car c'est le gaz naturel qui fait le complément ;
- Dans le cas où la couverture solaire du S4-RC est de 70%, il devient plus impactant que le scénario S4-Dref2
- Le classement entre les scénarios dépend fortement de la couverture solaire.

6.5.2.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques en faisant varier la couverture solaire du scénario de référence (S4-RC).

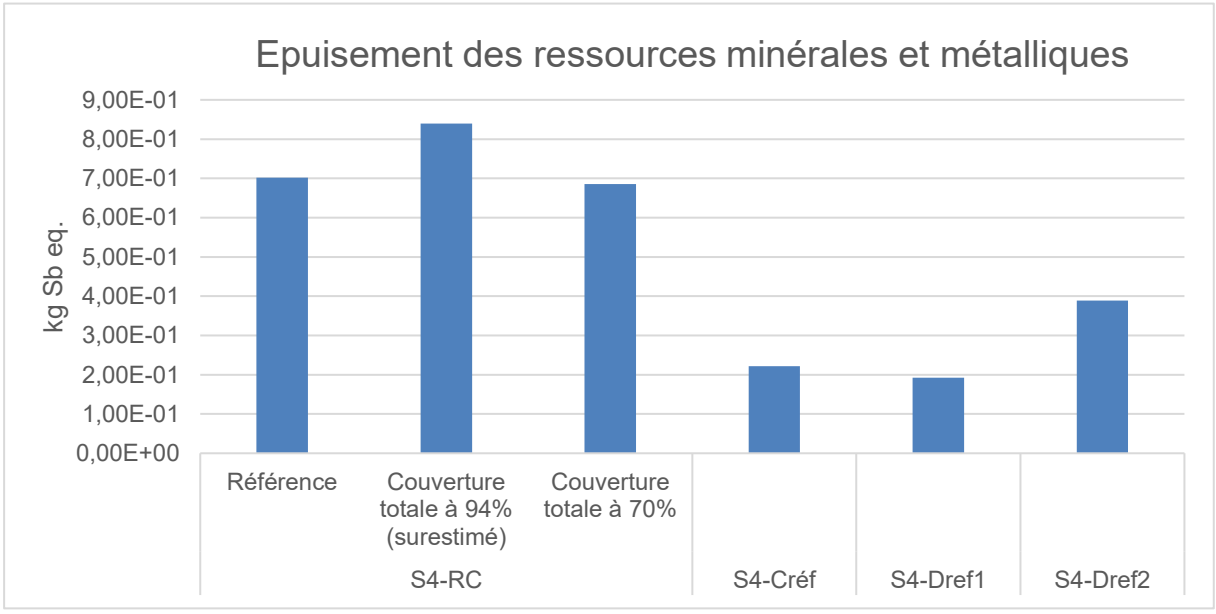


Figure 6-54 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 21% avec le scénario solaire surestimé permettant d'atteindre une couverture solaire de 94% ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.3 Analyse de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux

Les panneaux solaires sont modélisés dans le scénario de référence comme étant recyclés en fin de vie à 90% pour les métaux et à 0% pour les autres composants.

Une analyse de sensibilité est menée sur cette hypothèse, en prenant en compte trois autres variantes :

Taux de recyclage en fin de vie (%)	Référence	Optimiste	Moyen	Pessimiste
Matières métalliques	90%	100%	50%	0%
Autres matières	0%	100%	50%	0%

Tableau 6-17 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S4-RC				S4-Créf	S4-Dref1	S4-Dref2			
		Optimiste	Moyen	Référence	Pessimiste			Optimiste	Moyen	Référence	Pessimiste
Changement climatique	kg CO_2 eq	3,15E+05	3,16E+05	3,16E+05	3,29E+05	1,30E+06	1,45E+06	9,60E+05	9,61E+05	9,61E+05	9,66E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	5,74E-02	5,75E-02	5,75E-02	5,82E-02	2,24E-01	2,30E-01	1,56E-01	1,56E-01	1,56E-01	1,56E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,70E+05	1,70E+05	1,70E+05	1,72E+05	8,02E+04	2,81E+03	8,37E+03	8,44E+03	8,41E+03	9,47E+03
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,01E+02	6,07E+02	6,08E+02	6,52E+02	1,07E+03	1,11E+03	8,31E+02	8,33E+02	8,33E+02	8,51E+02
Particules fines	disease inc.	9,15E-03	9,27E-03	9,31E-03	1,02E-02	4,79E-03	3,70E-03	4,12E-03	4,17E-03	4,18E-03	4,58E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,92E-02	7,90E-02	7,91E-02	7,81E-02	1,55E-02	1,00E-02	2,00E-02	2,01E-02	2,01E-02	2,06E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,14E-02	2,14E-02	2,14E-02	2,21E-02	3,89E-03	2,11E-03	4,30E-03	4,34E-03	4,34E-03	4,80E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	9,21E+02	9,32E+02	9,37E+02	1,01E+03	1,07E+03	9,51E+02	8,12E+02	8,17E+02	8,19E+02	8,55E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,84E+01	6,93E+01	6,94E+01	7,71E+01	1,94E+01	1,28E+01	2,91E+01	2,95E+01	2,96E+01	3,27E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,09E+02	2,11E+02	2,12E+02	2,31E+02	2,93E+02	2,59E+02	2,15E+02	2,17E+02	2,18E+02	2,34E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	2,46E+03	2,47E+03	2,48E+03	2,60E+03	3,31E+03	2,82E+03	2,24E+03	2,25E+03	2,25E+03	2,30E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,12E+05	3,13E+05	3,13E+05	3,24E+05	6,86E+04	4,30E+04	7,82E+04	7,89E+04	7,89E+04	8,51E+04
Usage des sols	Pt	2,65E+06	2,64E+06	2,63E+06	2,66E+06	5,37E+05	2,66E+05	7,56E+05	7,52E+05	7,47E+05	7,58E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	6,66E+04	6,67E+04	6,67E+04	6,76E+04	2,84E+04	1,09E+04	3,18E+04	3,19E+04	3,19E+04	3,22E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	7,69E+06	7,71E+06	7,70E+06	7,83E+06	2,12E+07	2,06E+07	1,38E+07	1,38E+07	1,38E+07	1,38E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	7,02E-01	7,24E-01	7,33E-01	8,56E-01	2,22E-01	1,92E-01	3,64E-01	3,82E-01	3,89E-01	4,88E-01

6.5.3.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le taux de recyclage des panneaux solaires.

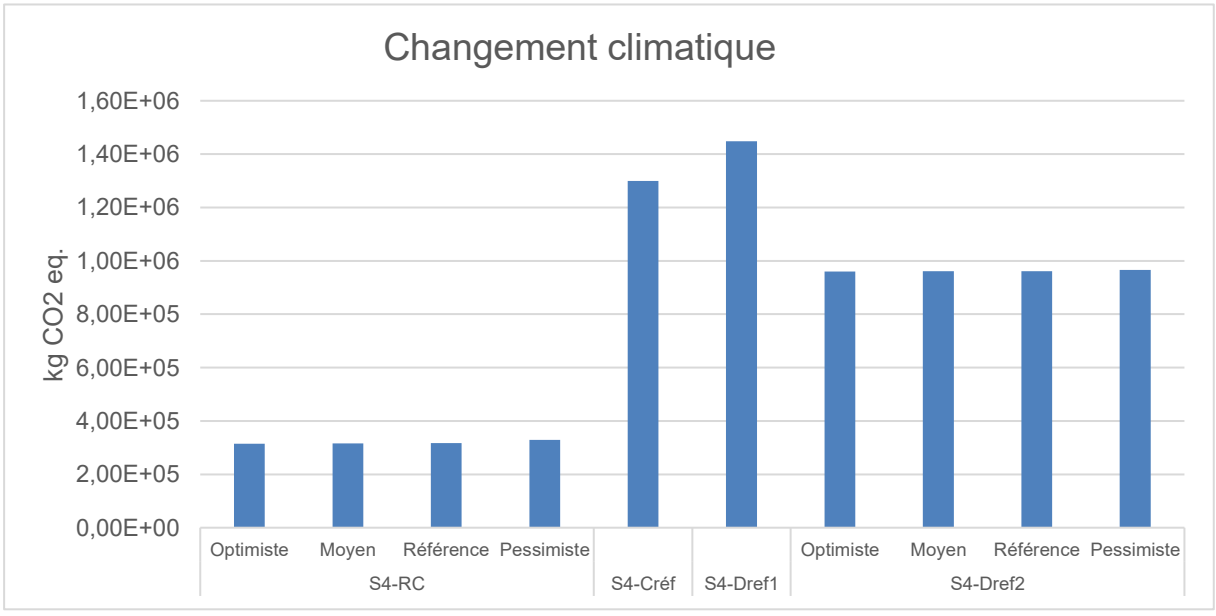


Figure 6-55 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 10% avec le taux de recyclage des panneaux solaires à 0 ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.3.2 Toxicité humaine, effets cancérogènes

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes en faisant varier le taux de recyclage des panneaux solaires.

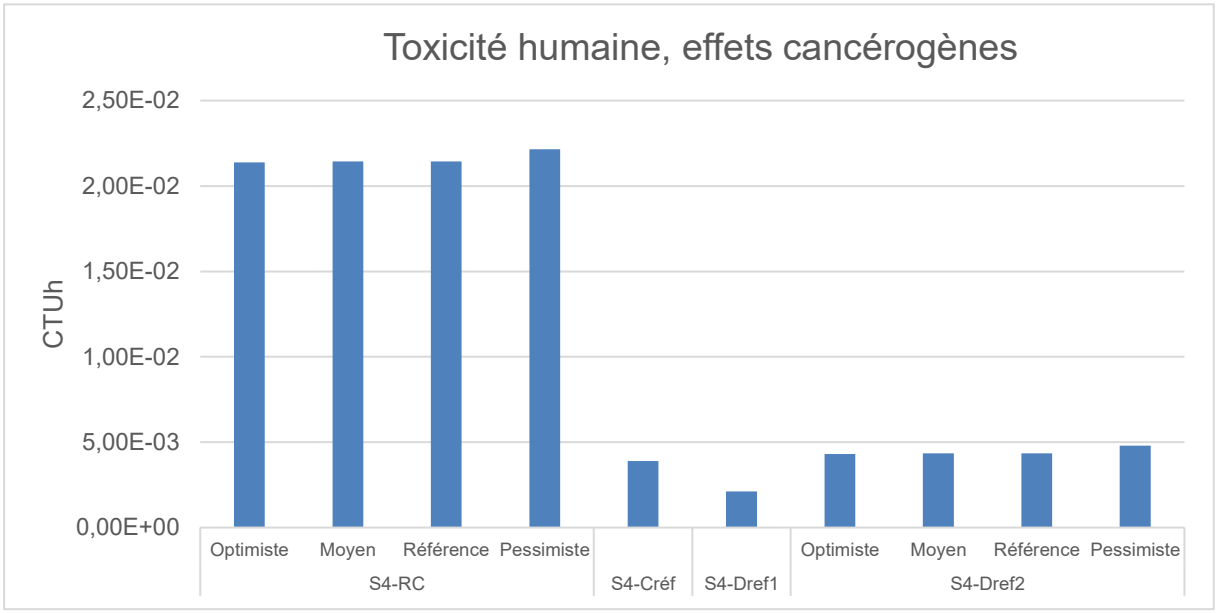


Figure 6-56 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-Dref2 augmente de 11% ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur des particules fines en faisant varier le taux de recyclage des panneaux solaires.

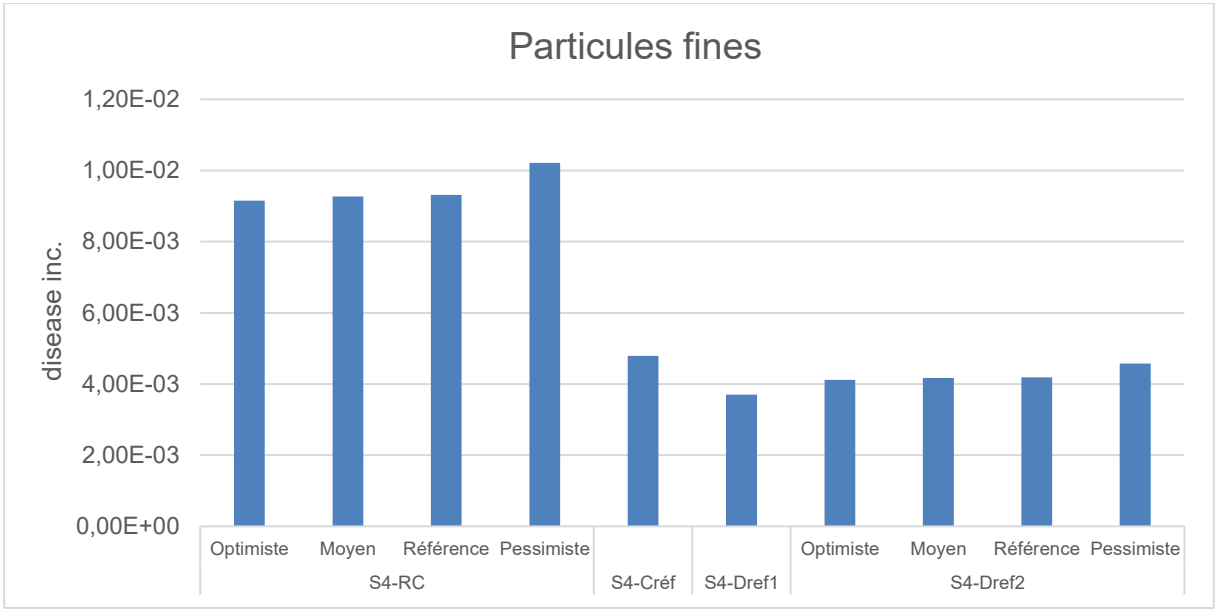


Figure 6-57 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 10% avec le taux de recyclage des panneaux solaires à 0 et le S4-Dref2 augmente de 10% ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le taux de recyclage des panneaux solaires.

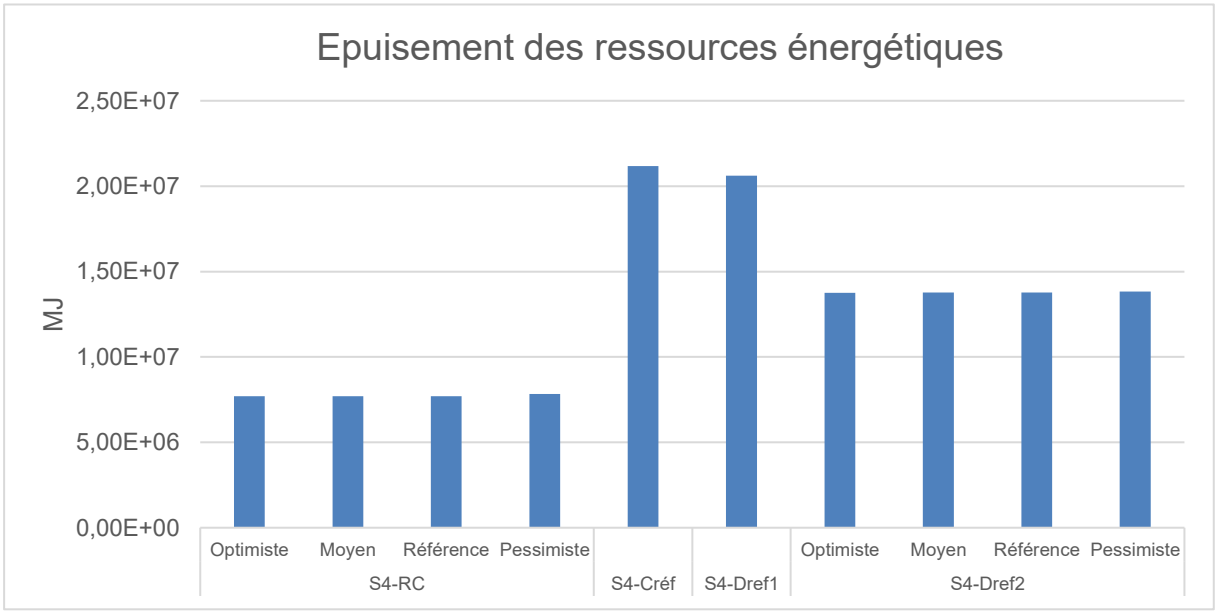


Figure 6-58 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Aucun scénario ne présente de variation sensible à ce paramètre sur cet indicateur ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 4 sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier le taux de recyclage des panneaux solaires.

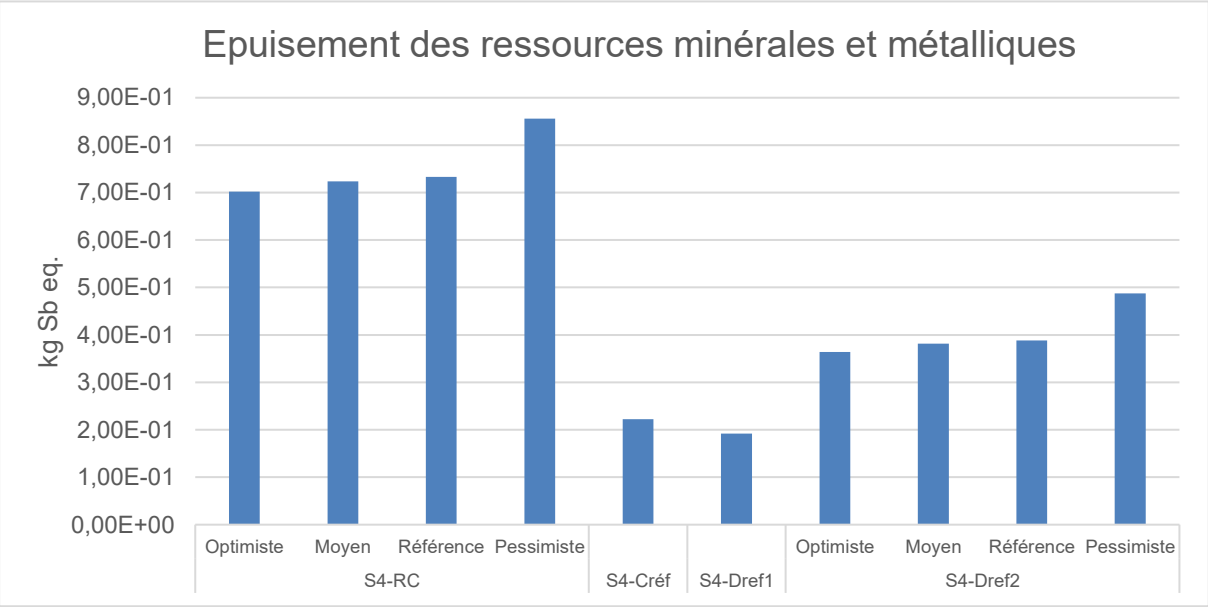


Figure 6-59 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le S4-RC augmente de 18% avec le taux de recyclage des panneaux solaires à 0 et le S4-Dref2 augmente de 25% ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes.

6.5.4 Conclusions sur les sensibilités du cas d'étude 4

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 4 est présentée dans le tableau suivant. Trois analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 4, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Tableau 6-18 : Cas d'étude 4 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Taux de couverture solaire (uniquement sur S4-RC)	Taux de recyclage des panneaux (uniquement sur S4-RC et S4-Dref2)
	Chauffage	ADEME	Industrie		
Changement climatique					
Particules fines					
Toxicité humaine cancérogène					
Epuisement des ressources énergétiques					
Epuisement des ressources minérales et métalliques					

Les analyses de sensibilité dans le scénario 4 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée.
- **Taux de couverture solaire** : le taux de couverture solaire peut bouleverser les scores. Un surdimensionnement du système amène à une augmentation des impacts en toxicité humaine et épuisement des ressources minérales et métalliques et améliore de façon faiblement significative l'impact sur le changement climatique. A l'inverse, un taux de couverture de 70% challenge la performance environnementale du scénario centralisé S4-RC par rapport au scénario solaire décentralisé S4-Dref2 sur les impacts changement climatique et épuisement des ressources énergétiques, tout en améliorant de manière faiblement significative les impacts toxicité humaine, particules fines et épuisement des ressources minérales et métalliques.
- **Taux de recyclage des panneaux solaires** : un changement de taux de recyclage des panneaux solaires ne modifie pas la hiérarchie entre les différents scénarios. Cependant, l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques est très lié à ce paramètre.

6.6 Cas d'étude 5

Pour le cas d'étude 5, différentes analyses de sensibilités ont été menées :

- Le mix considéré pour les équipements de froid : le mix par usage « chauffage », le mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix « Industrie » ont été utilisés ;
- Pour le scénario S5-R, la valeur du paramètre B dans les formules de la méthode CFF est modifiée : elle passe d'une valeur B=1 où la chaleur fatale est considérée comme gratuite à une valeur B=0 (recommandée par les guides méthodologiques) qui donne donc les bénéfices au producteur de la chaleur. Dans ce dernier cas, la chaleur fatale sera modélisée par de la combustion de gaz naturel
- Pour le scénario S5-Créf, la nature du réfrigérant est changée : on passe d'un réfrigérant avec un PRG de 4 à un réfrigérant avec un PRG de 1300.
- La température de l'eau approvisionnée
- La température de la source d'énergie fatale

6.6.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 5 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle

indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-19 : Cas d'étude 5 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S5-R				S5-Créf			
		Réf.	Usage	ADEME	Industrie	Réf.	Usage	ADEME	Industrie
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,73E+04	9,99E+04	7,69E+04	7,18E+04	2,76E+05	4,94E+05	1,81E+05	1,49E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,22E-02	3,22E-02	1,60E-02	3,24E-02	1,46E-01	1,40E-01	7,11E-02	1,41E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	2,90E+05	2,86E+05	1,07E+05	3,36E+05	1,32E+06	9,88E+05	4,69E+05	1,46E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	3,05E+02	3,11E+02	2,64E+02	2,82E+02	6,60E+02	1,20E+03	4,70E+02	5,08E+02
Particules fines	disease inc.	6,08E-03	6,05E-03	8,34E-03	5,31E-03	1,49E-02	1,22E-02	2,54E-02	1,01E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,80E-02	2,82E-02	2,89E-02	3,24E-02	3,80E-02	5,11E-02	4,18E-02	4,73E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,14E-03	7,14E-03	7,56E-03	8,28E-03	6,54E-03	6,95E-03	8,48E-03	7,53E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	6,29E+02	6,37E+02	9,23E+02	4,69E+02	1,86E+03	2,55E+03	3,22E+03	9,48E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	4,68E+01	4,74E+01	3,90E+01	4,73E+01	1,05E+02	1,51E+02	6,88E+01	7,75E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	1,21E+02	1,23E+02	1,05E+02	1,13E+02	3,25E+02	4,69E+02	2,49E+02	2,62E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,70E+03	1,69E+03	3,29E+03	9,93E+02	5,42E+03	4,91E+03	1,28E+04	2,00E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,24E+05	1,24E+05	1,27E+05	1,43E+05	1,62E+05	1,83E+05	1,73E+05	1,74E+05
Usage des sols	Pt	1,08E+06	1,06E+06	1,54E+06	2,31E+06	3,55E+06	1,77E+06	5,68E+06	8,75E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	7,43E+04	7,39E+04	4,37E+04	7,90E+04	2,96E+05	2,60E+05	1,55E+05	3,02E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	6,92E+06	6,88E+06	2,98E+06	7,51E+06	2,97E+07	2,60E+07	1,15E+07	3,10E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,85E-01	3,87E-01	6,42E-01	5,67E-01	6,92E-01	8,35E-01	1,88E+00	8,22E-01

L'analyse de sensibilité est réalisée uniquement sur les indicateurs pertinents identifiés au paragraphe 5.5.2

6.6.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 5 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

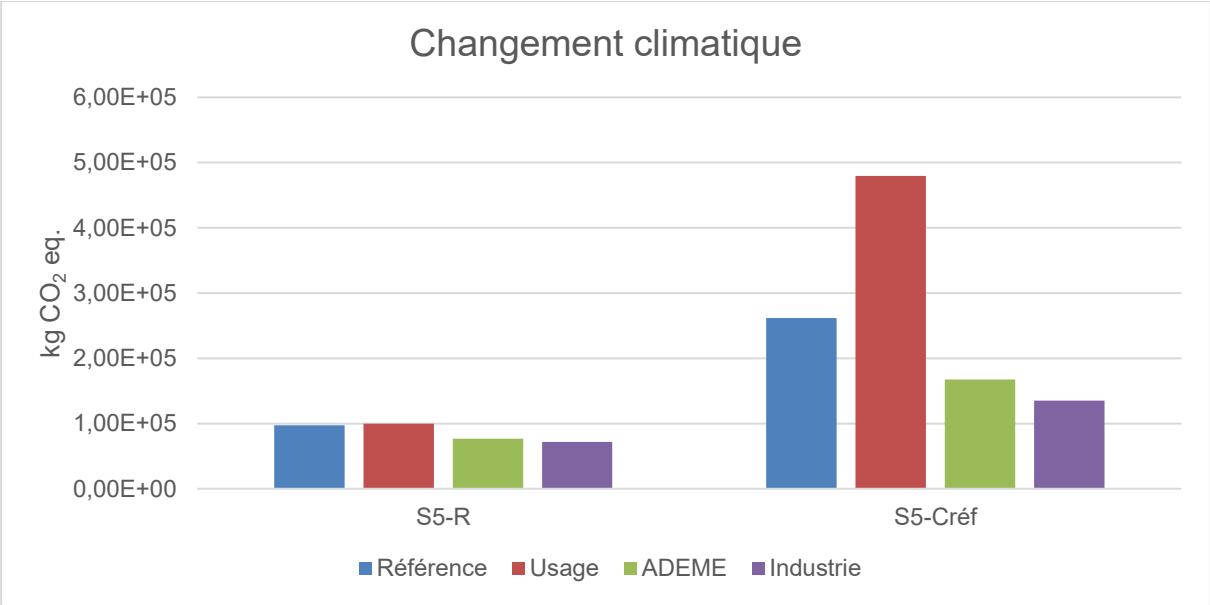


Figure 6-60 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- La variation du mix électrique a une faible influence sur le scénario S5-R. En effet, la consommation énergétique dans ce scénario est principalement fatale et est donc peu influencée par le mix ;
- Du fait de sa consommation importante en électricité (2,5 GWh), le scénario S5-Créf va être plus sensible au changement de mix électrique. Plus le mix sera carboné, plus l'impact sera important ;
- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée. Dans le meilleur des cas (mix Industrie), le scénario S5-Créf est 3 fois plus impactant que le scénario S5-R.

6.6.1.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 5 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

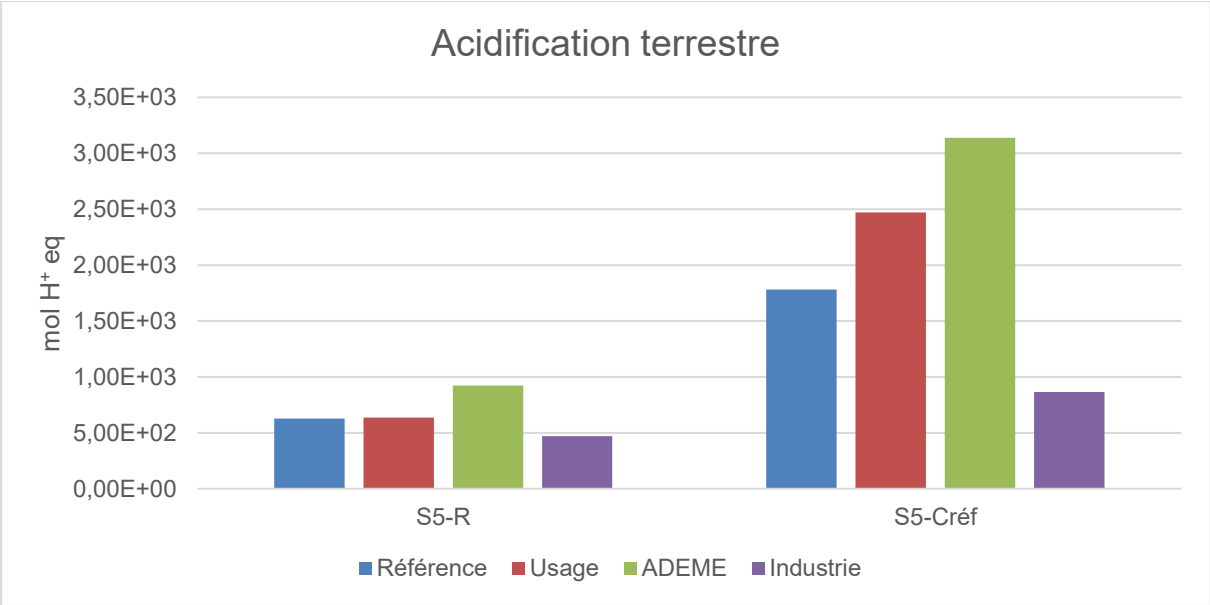


Figure 6-61 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Pour les 2 scénarios, le mix ADEME est celui qui présente les impacts les plus importants. Les impacts sont causés par des émissions d'ammoniac pendant la production du biogaz utilisé en cogénération, à cause de l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat ;
- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée. Dans le meilleur des cas (mix Industrie), le scénario S5-Créf est 3 fois plus impactant que le scénario S5-R. Cela est dû à une consommation électrique plus importante dans le scénario S5-Créf.

6.6.1.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 5 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

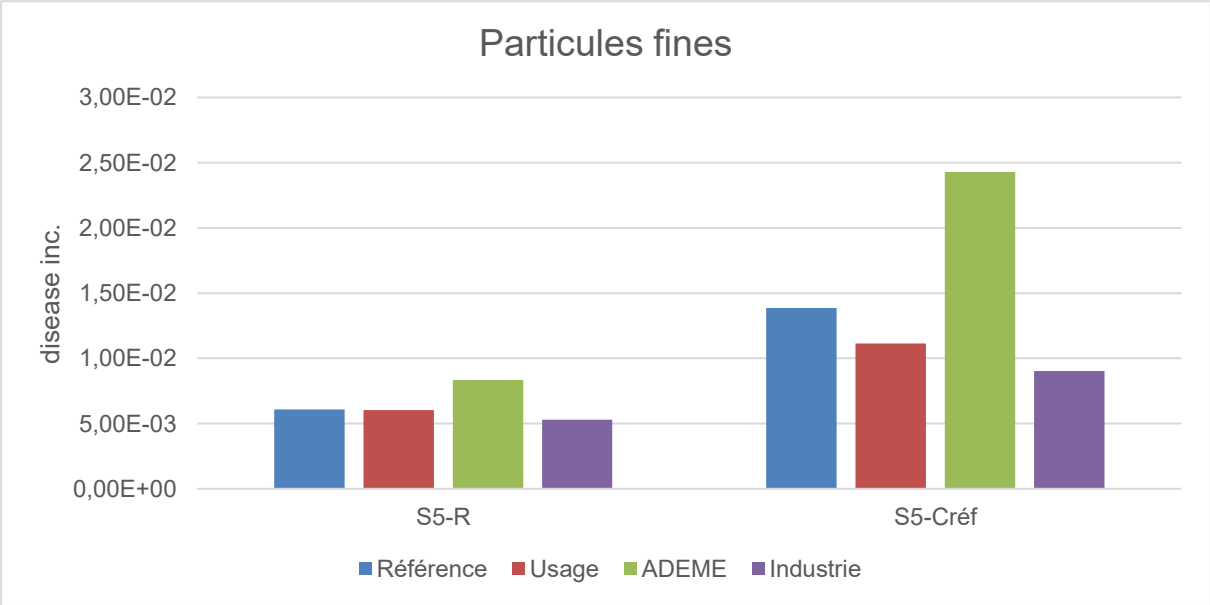


Figure 6-62 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Pour les 2 scénarios, le mix ADEME est celui qui présente les impacts les plus importants. Cela provient des émissions d'ammoniac pendant la production du biogaz utilisé en cogénération (hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée. Dans le meilleur des cas (mix Industrie et Usage), le scénario S5-Créf est 3 fois plus impactant que le scénario S5-R. Cela est dû à une consommation électrique plus importante dans le scénario S5-Créf.

6.6.1.4 Toxicité humaine, effets cancérogènes

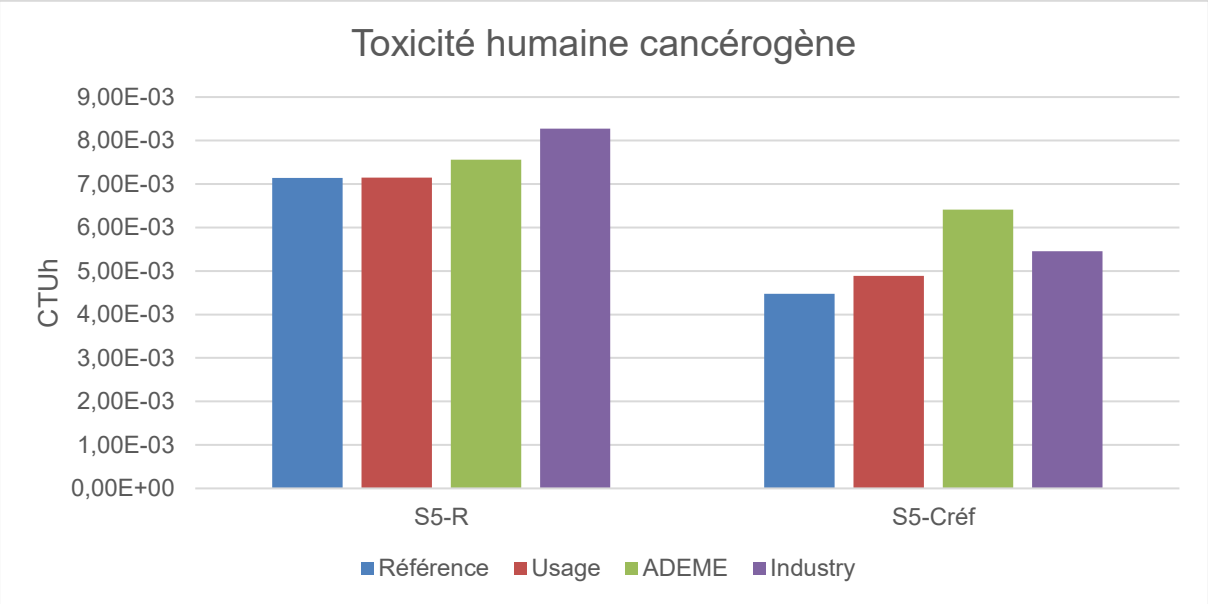


Figure 6-63 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée

6.6.1.5 *Epuisement des ressources énergétiques*

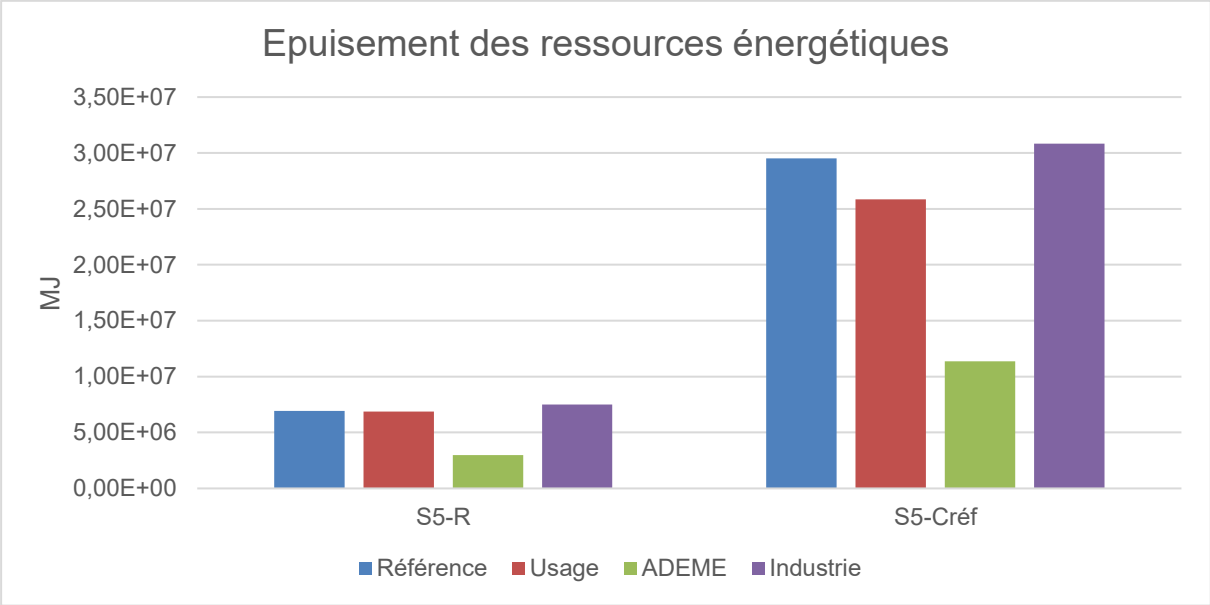


Figure 6-64 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Pour les 2 scénarios, le mix ADEME est celui qui présente les impacts les plus faibles. En effet, le mix ADEME est composé d'une part importante d'énergies renouvelables tandis que les autres mix se reposent notamment sur l'utilisation d'uranium pour la production nucléaire d'électricité ;
- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée.

6.6.1.6 *Epuisement des ressources minérales et métalliques*

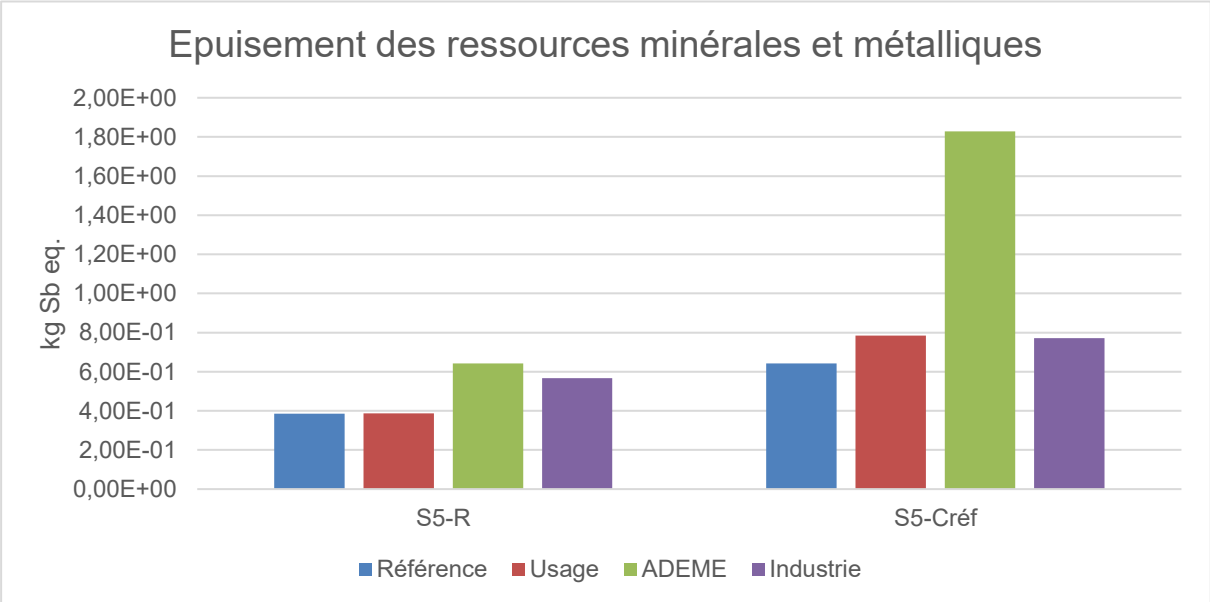


Figure 6-65 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et des métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Pour les 2 scénarios, le mix ADEME est celui qui présente les impacts les plus importants. Le mix ADEME est majoritairement composé d'énergies renouvelables dont le solaire et l'éolien.

Ces deux énergies demandent une utilisation accrue de métaux dans la production de leurs infrastructures par rapport aux énergies fossiles ;
- Quel que soit le mix électrique considéré, la hiérarchie entre les 2 scénario n'est pas modifiée.

6.6.2 Analyse de sensibilité sur le facteur B de la formule CFF pour le scénario S5-R

Dans la formule de fin de vie présentée précédemment, un facteur B est introduit pour allouer entre producteur et utilisateur les impacts et crédits de l'incinération. Ce facteur B est égal à 1 dans le rapport, ce qui permet de considérer l'énergie fatale en entrée comme étant gratuite. Cependant, les recommandations de PEF v6.3 à l'échelle européenne, promeuvent un coefficient B égal à 0, se traduisant par des impacts et crédits de l'incinération imputés au producteur de matériau. Dans ce cas, l'énergie issue de l'incinération qui est utilisée par un utilisateur ultérieur doit être comptabilisée comme de l'énergie primaire fossile, ici approximée par du gaz naturel.

Le tableau suivant fournit les résultats des indicateurs midpoint pour le scénario S5-R. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-20 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la valeur du facteur B

Indicateur	Unité	S5-R		S5-Créf	
		B=1 Référence	B=0	B=1 Référence	B=0
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,73E+04	5,79E+06	2,62E+05	2,62E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,22E-02	3,40E-01	1,45E-01	1,45E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	2,90E+05	3,59E+05	1,31E+06	1,31E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	3,05E+02	2,52E+03	5,99E+02	5,99E+02
Particules fines	disease inc.	6,08E-03	1,65E-02	1,39E-02	1,39E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,80E-02	4,06E-02	3,15E-02	3,15E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,14E-03	9,53E-03	4,47E-03	4,48E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	6,29E+02	2,53E+03	1,78E+03	1,78E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	4,68E+01	6,24E+01	9,73E+01	9,73E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	1,21E+02	7,62E+02	3,08E+02	3,08E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,70E+03	8,80E+03	5,23E+03	5,23E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,24E+05	1,70E+05	1,31E+05	1,31E+05
Usage des sols	Pt	1,08E+06	1,45E+06	3,44E+06	3,44E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	7,43E+04	9,94E+04	2,92E+05	2,92E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	6,92E+06	3,54E+07	2,95E+07	2,95E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,85E-01	4,98E-01	6,42E-01	6,42E-01

6.6.2.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le facteur B.

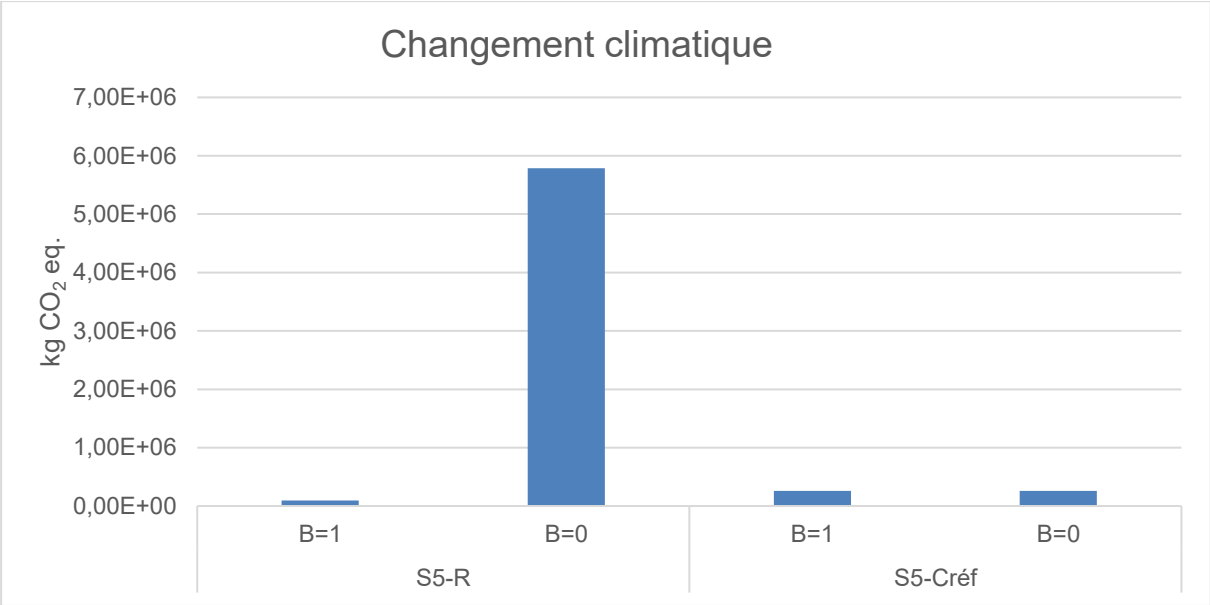


Figure 6-66 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur le changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 60 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1. En effet, dans un cas nous avons considéré une énergie gratuite (B=1), tandis que dans l'autre (B=0), nous devons prendre en compte une utilisation théorique de gaz naturel ;
- Cette consommation entraîne des émissions de CO_2 due à la combustion du gaz naturel modélisé ;
- Le choix de la valeur de B modifie la hiérarchisation entre les scénarios S5-R et S5-Créf. Une valeur B=0 rend le scénario S5-Créf plus intéressant en termes de réchauffement climatique que le scénario S5-R ;
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas significativement le scénario C-réf.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation des impacts du changement climatique.

6.6.2.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le facteur B.

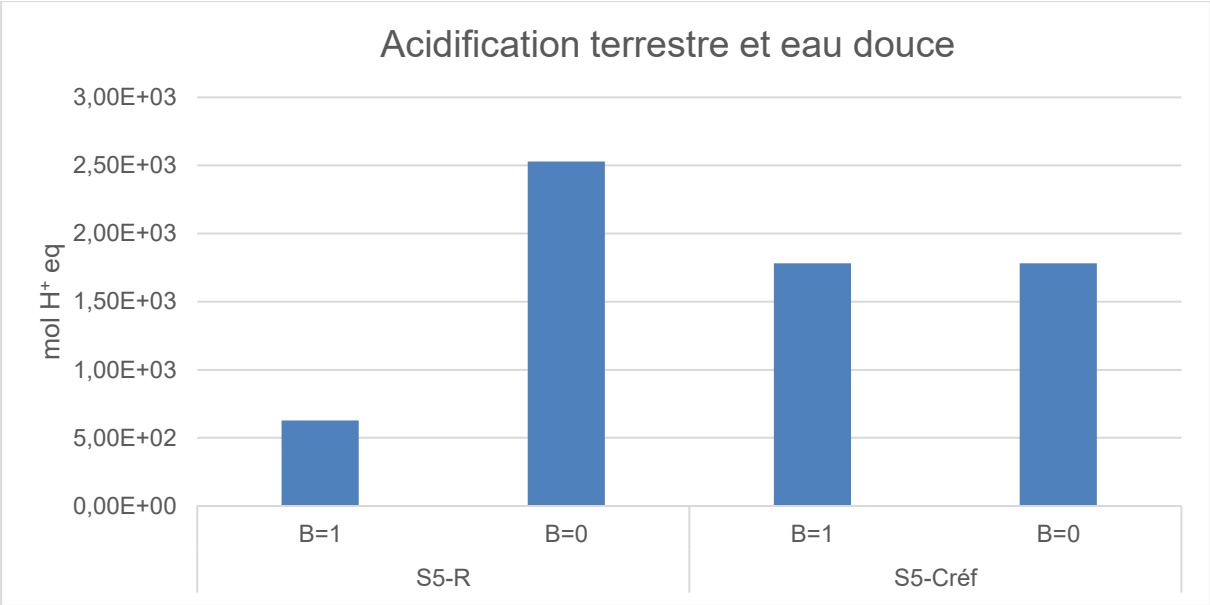


Figure 6-67 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 4 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1. Cela est due aux émissions directes de NOx lors de la combustion et de la phase de production ;
- Le choix de la valeur de B peut modifier les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, les deux scénarios ont des impacts similaires en termes d'acidification terrestre et eau douce
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas significativement le scénario C-réf.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation des impacts d'acidification.

6.6.2.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le facteur B.

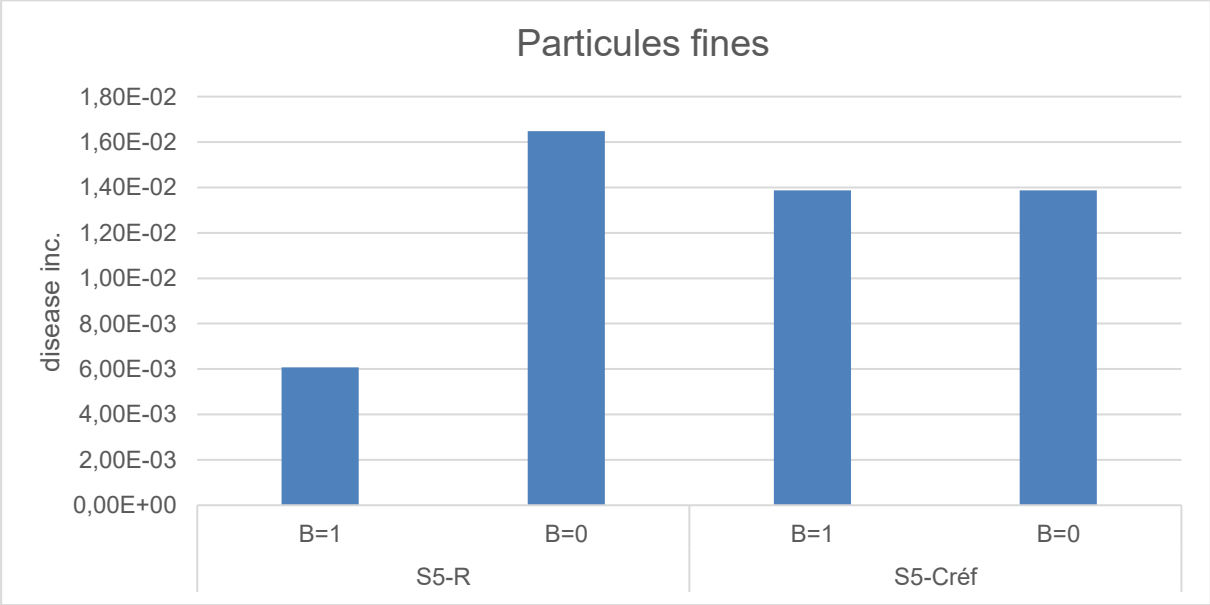


Figure 6-68 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur les particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 3 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1 à cause des émissions particules lors de la combustion du gaz naturel
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas le scénario C-réf ;
- Le choix de la valeur de B modifie la hiérarchie entre les 2 scénario : S5-Créf devient plus performant que S5-R lorsque la valeur de B passe de 1 à 0.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation des impacts de particules fines.

6.6.2.4 Toxicité humaine, effets cancérogènes

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de toxicité humaine (effets cancérogènes) en faisant varier le facteur B.

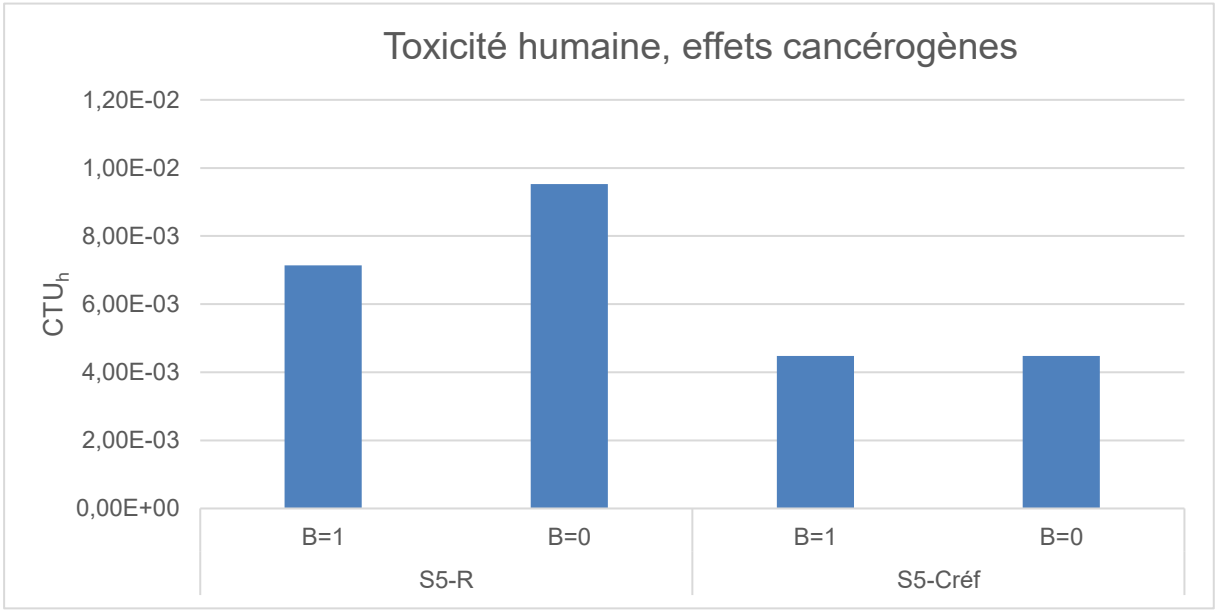


Figure 6-69 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur la toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 1,3 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1 à cause des émissions particules lors de la combustion du gaz naturel ;
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, le scénario S5-Cref présente toujours de meilleurs résultats que le scénario S5-RC. Cependant, cette différence est plus marquée et peut être plus interprétée comme significative au regard des incertitudes liées à la méthode ;
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas significativement le scénario C-réf.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation des impacts de toxicité humaine.

6.6.2.5 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le facteur B.

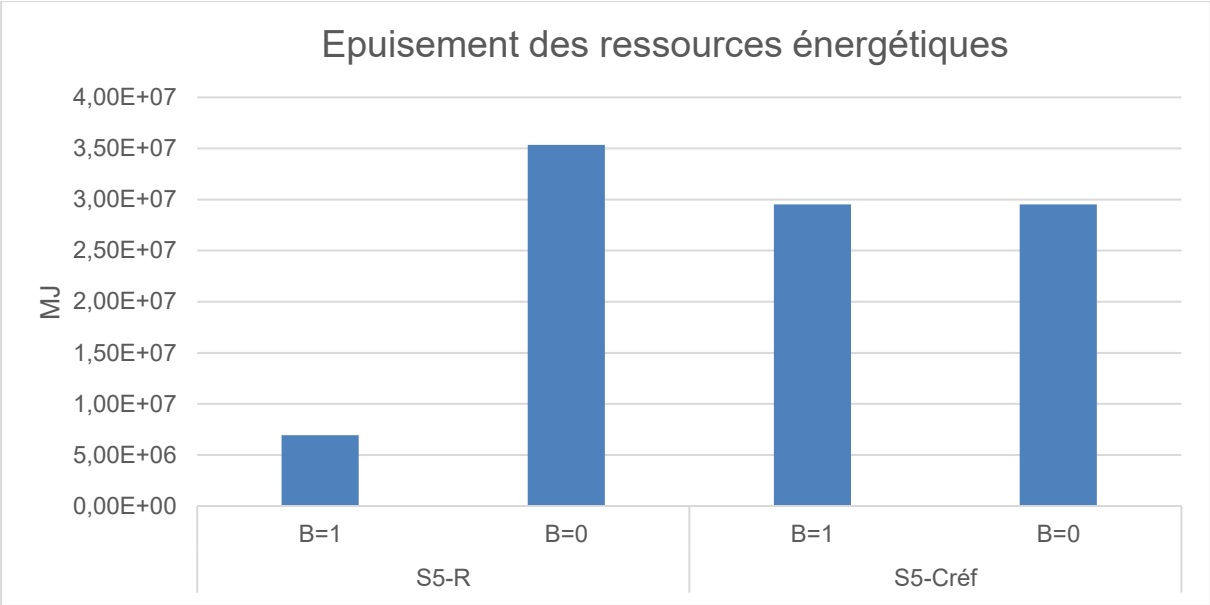


Figure 6-70 : Cas d'étude 5 : Analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 5 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1 à cause de l'utilisation de gaz naturel ;
- Le choix de la valeur de B modifie les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, le scénario S5-Créf présente de meilleurs résultats que le scénario S5-RC ;
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas significativement le scénario C-réf.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation de l'épuisement des ressources fossiles.

6.6.2.6 Epuisement des ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier le facteur B.

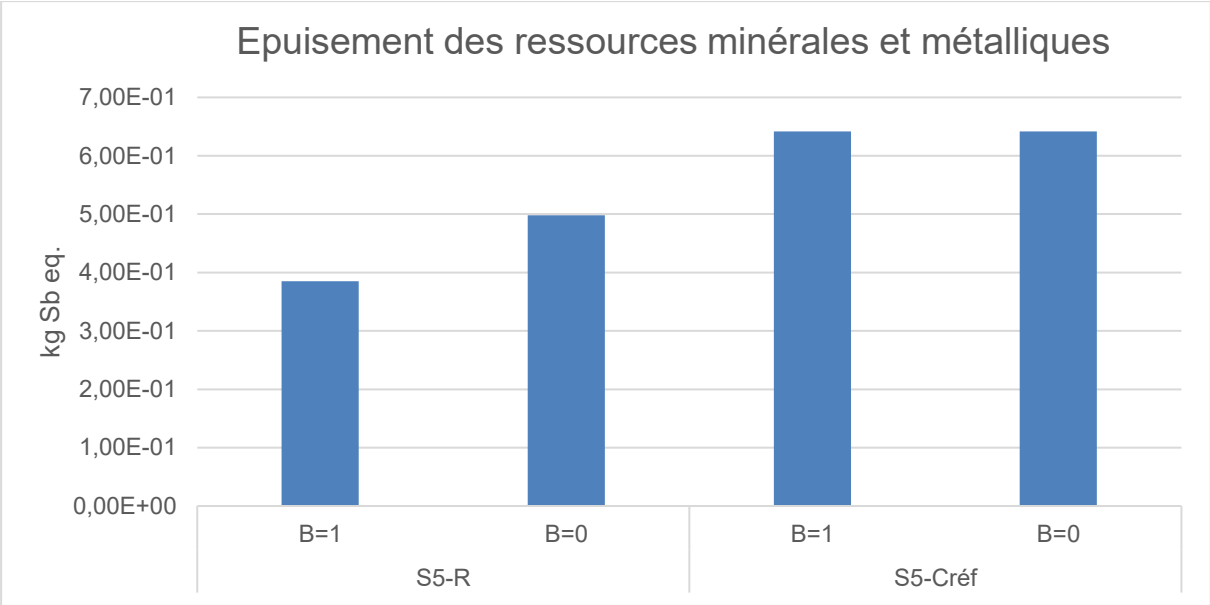


Figure 6-71 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Lorsque B=0, le scénario S5-R devient 1,3 fois plus impactant par rapport à une valeur B=1.
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas les conclusions entre les deux scénarios : si B=0, le scénario S5-R présente toujours de meilleurs résultats que le scénario S5-Créf. Cependant, la hiérarchie observée significativement pour le scénario de référence est controversée au regard des incertitudes ,
- Le choix de la valeur de B ne modifie pas significativement le scénario C-réf.

Le choix de la valeur de B est un paramètre crucial pour l'interprétation des impacts l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

6.6.3 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant pour le scénario S5-Créf

Le changement de réfrigérant peut impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements, ce qui n'a pas été considéré dans cette analyse de sensibilité. Seule la nature du réfrigérant a été modifiée, en conservant les performances initiales. Dans le cas de l'analyse de sensibilité sur le réfrigérant, seul l'indicateur changement climatique sera étudié car seul le PRG du réfrigérant a été modifié pour du R134 à la place du R1234ze.

Le tableau suivant fournit les résultats des indicateurs midpoints pour le scénario S5-Créf. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-21 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint concernés de l'analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Catégorie d'impact	Unité	Référence	R134a
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,62E+05	2,79E+05

L'unique indicateur sur lequel la nature du réfrigérant provoque une évolution de l'impact est le changement climatique.

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant

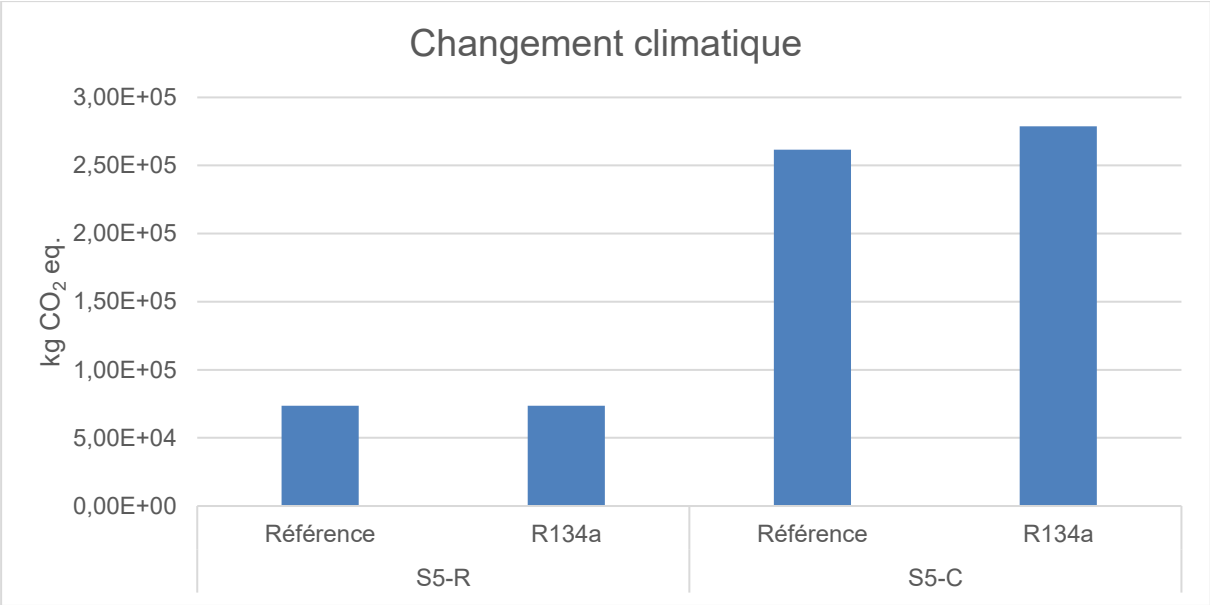


Figure 6-72 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur le changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le changement de réfrigérant augmente les impacts du scénario S5-Créf de 7% ;
- Le scénario S5-Créf est plus impactant que S5-R en termes de réchauffement climatique à cause d'une plus forte consommation électrique. L'utilisation d'un réfrigérant avec un PRG plus élevé ne permet logiquement pas une modification de la hiérarchie entre les 2 scénarios.

6.6.4 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau dans le circuit secondaire de chaque bâtiment : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle 7/12°C. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 2°C :

- Scénario + 2°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 5°C / 10°C ;
- Scénario – 2°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 9°C / 14°C.

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-22 : Consommations électriques et d'énergie fatale des analyses de sensibilités à +/- 2°C de la température de consigne

		Référence	+2°C	-2°C
Consommation d'électricité (kWh)	S5-R	24 088	23 341	24 846
	S5-Créf	2 031 022	1 858 755	2 204 742
Consommation d'énergie fatale (kWh)	S5-R	25 459 278	24 669 590	26 260 328
	S5-Créf	2 031 022	2 031 022	2 031 022

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température, notamment parce que les plusieurs éléments ne sont pas pris en compte (les différences de dimensionnement etc.).

Le tableau suivant fournit les résultats des indicateurs midpoints pour les 2 scénarios du cas d'étude 5. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-23 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température d'approvisionnement

Indicateur	Unité	S5-R			S5-Créf		
		+2°C RFU	Référence	-2°C RFU	+2°C RFU	Référence	-2°C RFU
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,72E+04	9,73E+04	9,74E+04	2,44E+05	2,62E+05	2,79E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,22E-02	3,22E-02	3,23E-02	1,36E-01	1,45E-01	1,54E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	2,90E+05	2,90E+05	2,91E+05	1,23E+06	1,31E+06	1,40E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	3,04E+02	3,05E+02	3,05E+02	5,60E+02	5,99E+02	6,39E+02
Particules fines	disease inc.	6,07E-03	6,08E-03	6,08E-03	1,30E-02	1,39E-02	1,48E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,80E-02	2,80E-02	2,81E-02	2,97E-02	3,15E-02	3,34E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,14E-03	7,14E-03	7,14E-03	4,22E-03	4,47E-03	4,73E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	6,28E+02	6,29E+02	6,29E+02	1,66E+03	1,78E+03	1,90E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	4,68E+01	4,68E+01	4,69E+01	9,11E+01	9,73E+01	1,04E+02
Eutrophisation, marine	kg N eq	1,21E+02	1,21E+02	1,21E+02	2,87E+02	3,08E+02	3,28E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,69E+03	1,70E+03	1,70E+03	4,88E+03	5,23E+03	5,58E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,24E+05	1,24E+05	1,24E+05	1,23E+05	1,31E+05	1,39E+05
Usage des sols	Pt	1,08E+06	1,08E+06	1,08E+06	3,22E+06	3,44E+06	3,68E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	7,42E+04	7,43E+04	7,44E+04	2,72E+05	2,92E+05	3,12E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	6,91E+06	6,92E+06	6,93E+06	2,75E+07	2,95E+07	3,15E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,85E-01	3,85E-01	3,85E-01	6,05E-01	6,42E-01	6,79E-01

6.6.4.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

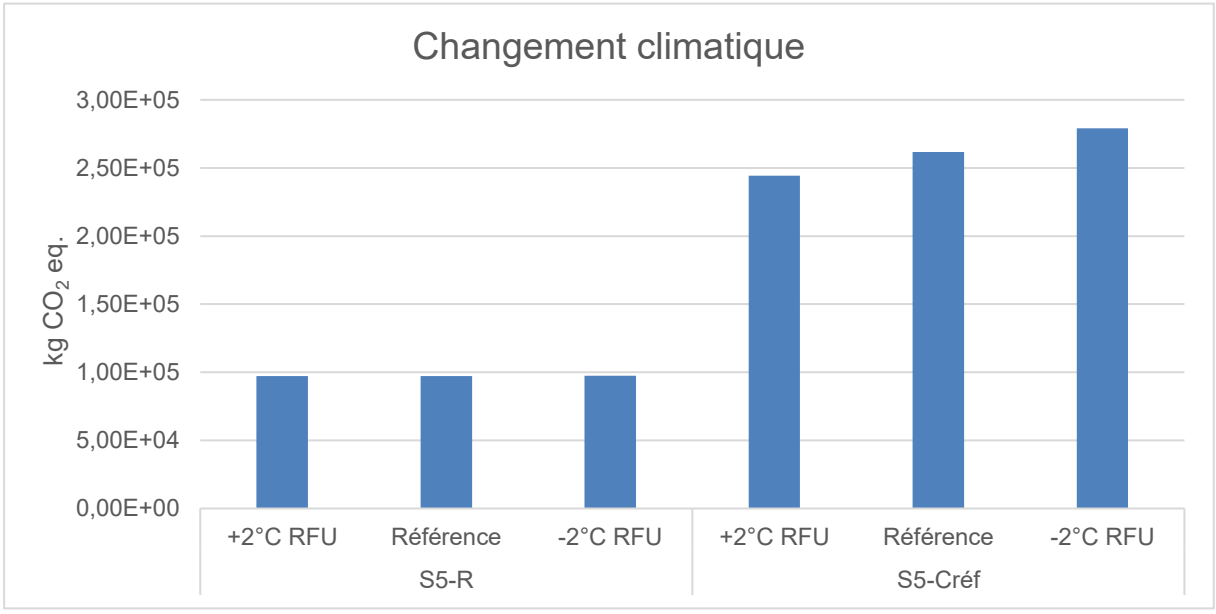


Figure 6-73 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur le changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau ;
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -7% et 7% par rapport à sa valeur de référence ;
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.4.2 *Acidification terrestre et eau douce*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

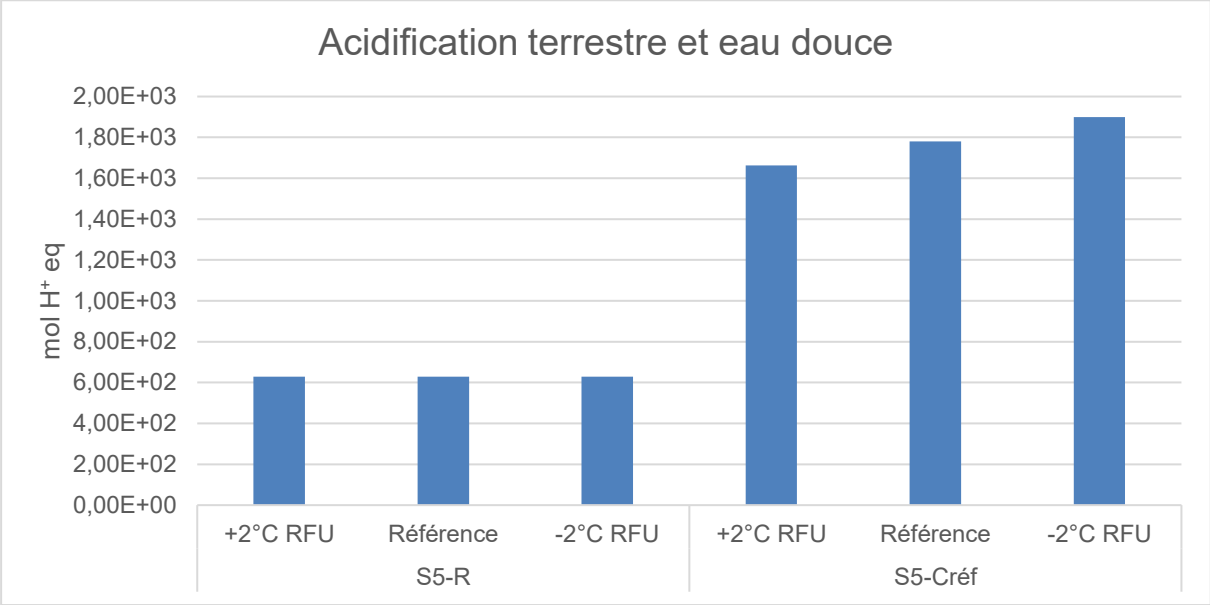


Figure 6-74 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l'acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -7% et 7% par rapport à sa valeur de référence.
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.4.3 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

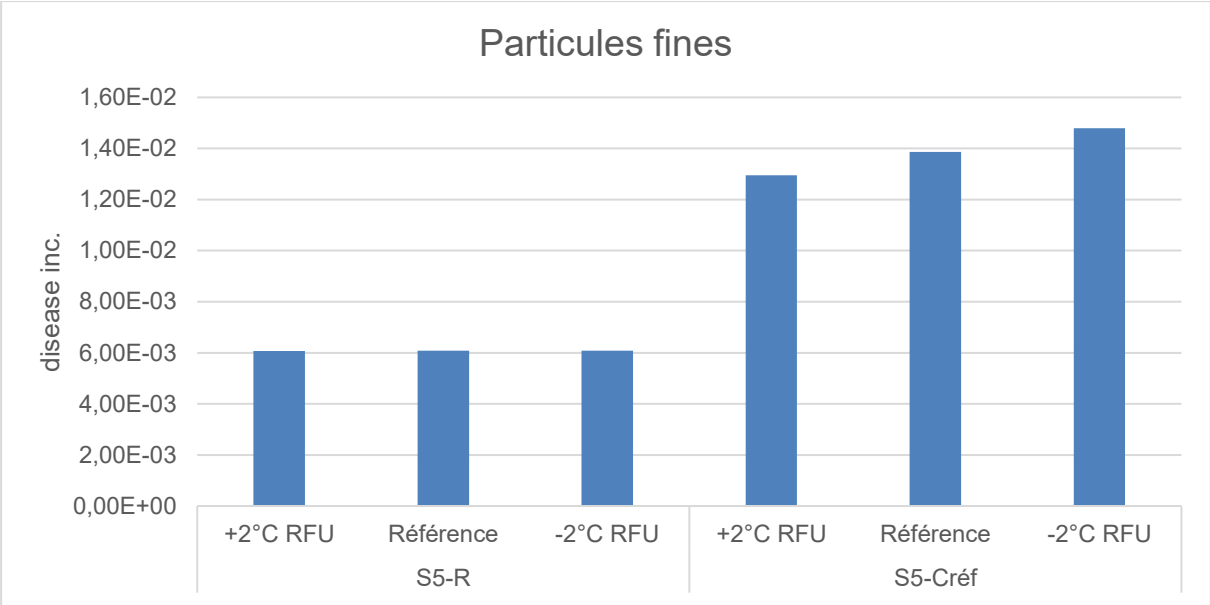


Figure 6-75 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur les particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau ;
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -7% et 7% par rapport à sa valeur de référence ;
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.4.4 Toxicité humaine cancérogène

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de toxicité humaine cancérogène en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

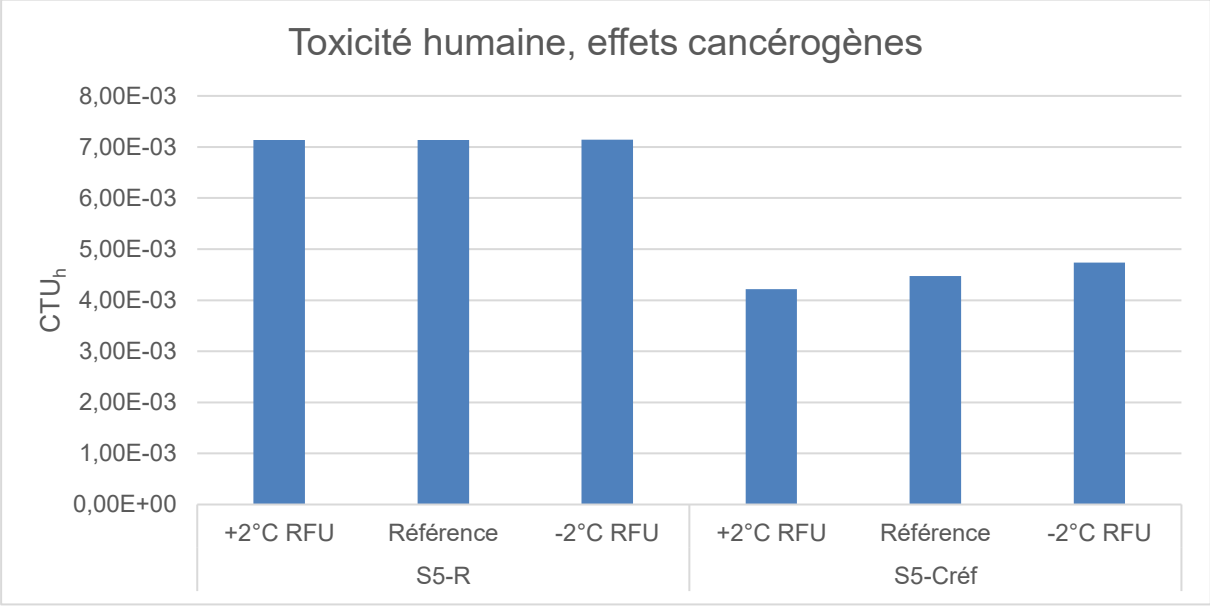


Figure 6-76 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur la toxicité humaine, effets cancérogènes

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau ;
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -6% et 6% par rapport à sa valeur de référence ;
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-Créf présente toujours de meilleurs résultats que S5-R.

6.6.4.5 *Epuisement des ressources énergétiques*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

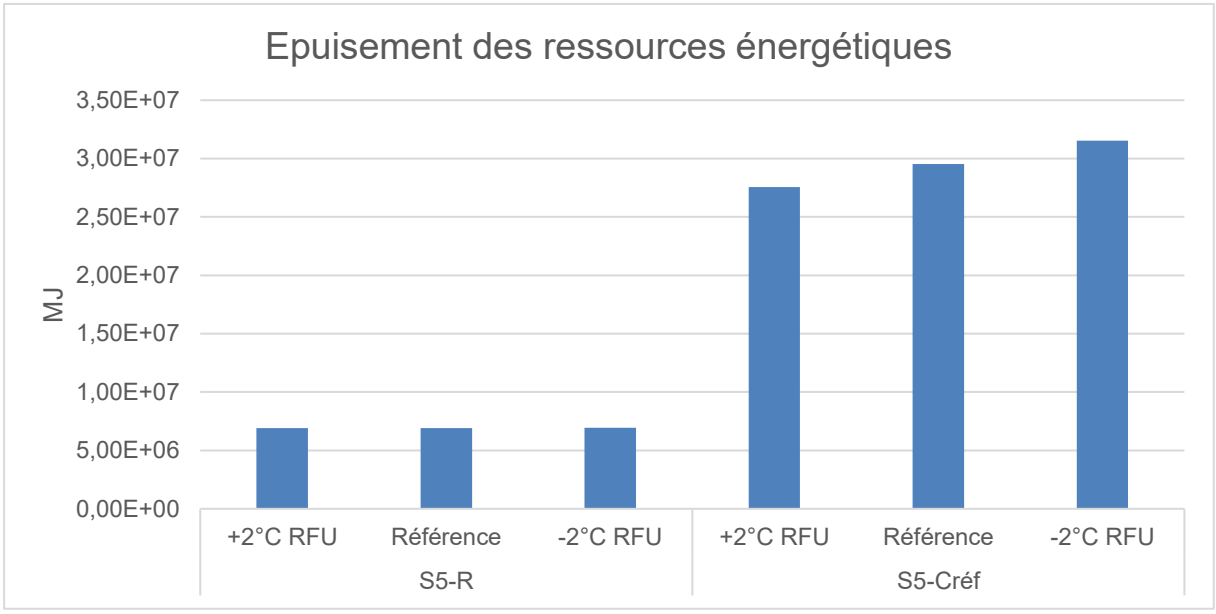


Figure 6-77 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l'épuisement des ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau ;
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -7% et 7% par rapport à sa valeur de référence ;
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.4.6 *Epuisement des ressources minérales et métalliques*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

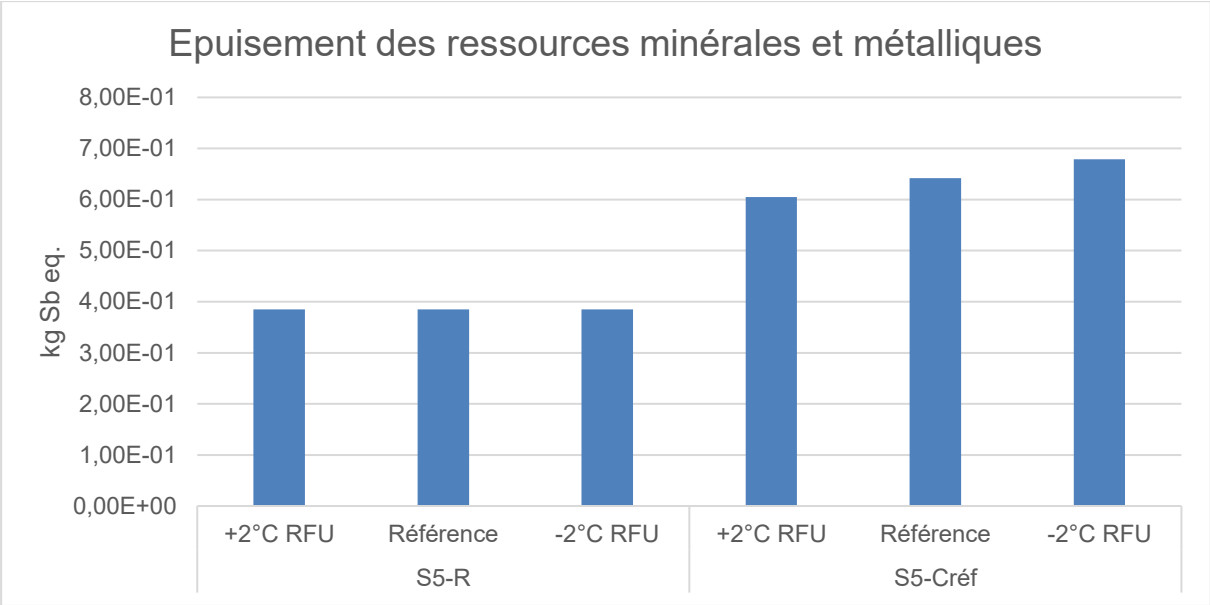


Figure 6-78 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de distribution du réseau ;
- Le scénario conventionnel S5-Créf varie lui entre -6% et 6% par rapport à sa valeur de référence ;
- Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.5 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau de la source fatale

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de la source fatale qui est à 100°C dans le scénario de référence. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température :

- Scénario + 5°C : la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 105°C;
- Scénario – 5°: la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 95°C ;
- Scénario – 10°: la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 90°C ;
- Scénario – 15°: la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 85°C.

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-24 : Consommation électrique et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de la source fatale

		Référence	+5°C	-5°C	-10°C	-15°C
Consommation d'électricité (kWh)	S5-R	24 088	23 017	26 483	29 407	35 311
	S5-Créf	2 031 022	2 031 022	2 031 022	2 031 022	2 031 022
Consommation d'énergie fatale (kWh)	S5-R	25 459 278	26 174 690	23 699 942	21 598 787	20 182 899
	S5-Créf	2 031 022	2 031 022	2 031 022	2 031 022	2 031 022

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température, notamment parce que les plusieurs éléments ne sont pas pris en compte (les différences de dimensionnement etc.).

Le tableau suivant fournit les résultats des indicateurs midpoints pour les 2 scénario du cas d'étude 5. Pour chaque indicateur, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique la sensibilité avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique l'alternative avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-25 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température de l'eau issue de source fatale

Indicateur	Unité	S5-R					S5-Créf
		+5°C chaleur fatale	Référence	-5°C chaleur fatale	-10°c chaleur fatale	-15°C chaleur fatale	Référence
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,72E+04	9,73E+04	9,75E+04	9,78E+04	9,84E+04	2,62E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	3,22E-02	3,22E-02	3,24E-02	3,25E-02	3,28E-02	1,45E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	2,90E+05	2,90E+05	2,91E+05	2,93E+05	2,96E+05	1,31E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	3,04E+02	3,05E+02	3,05E+02	3,06E+02	3,07E+02	5,99E+02
Particules fines	disease inc.	6,07E-03	6,08E-03	6,09E-03	6,11E-03	6,14E-03	1,39E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,80E-02	2,80E-02	2,81E-02	2,81E-02	2,82E-02	3,15E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,14E-03	7,14E-03	7,14E-03	7,15E-03	7,16E-03	4,47E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	6,28E+02	6,29E+02	6,30E+02	6,32E+02	6,36E+02	1,78E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	4,68E+01	4,68E+01	4,69E+01	4,70E+01	4,72E+01	9,73E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	1,21E+02	1,21E+02	1,22E+02	1,22E+02	1,23E+02	3,08E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	1,69E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,71E+03	1,72E+03	5,23E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,24E+05	1,24E+05	1,24E+05	1,24E+05	1,25E+05	1,31E+05
Usage des sols	Pt	1,08E+06	1,08E+06	1,08E+06	1,09E+06	1,09E+06	3,44E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	7,42E+04	7,43E+04	7,46E+04	7,49E+04	7,56E+04	2,92E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	6,91E+06	6,92E+06	6,95E+06	6,98E+06	7,05E+06	2,95E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	3,85E-01	3,85E-01	3,85E-01	3,86E-01	3,87E-01	6,42E-01

6.6.5.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

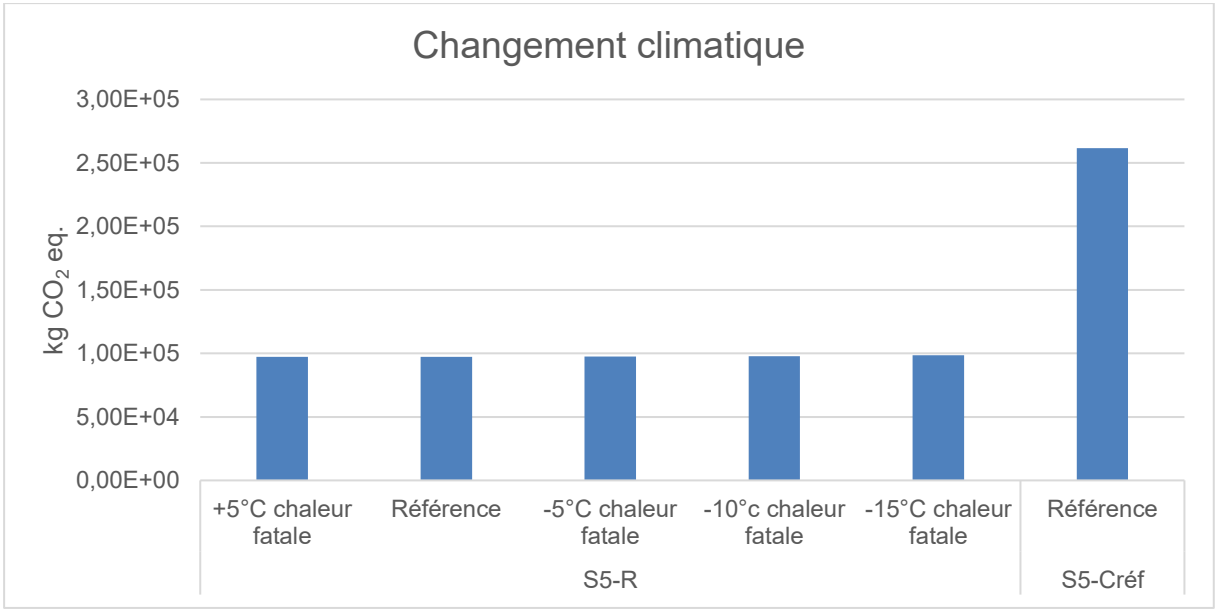


Figure 6-79 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur le changement climatique

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.

Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.5.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

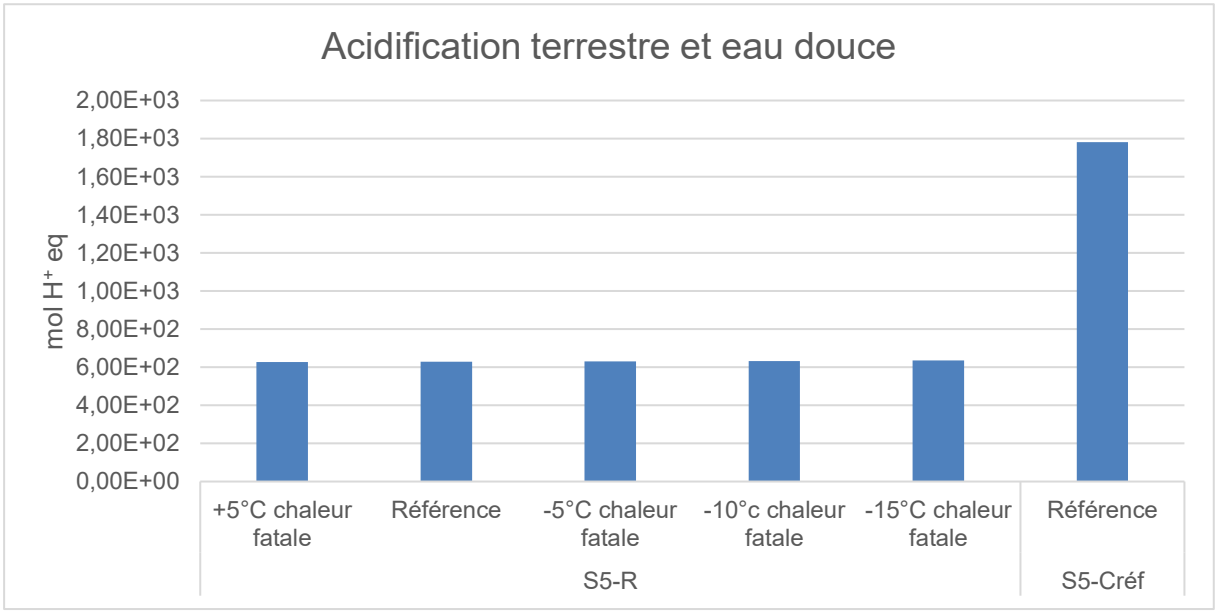


Figure 6-80 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'acidification terrestre et eau douce

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.

Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.5.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

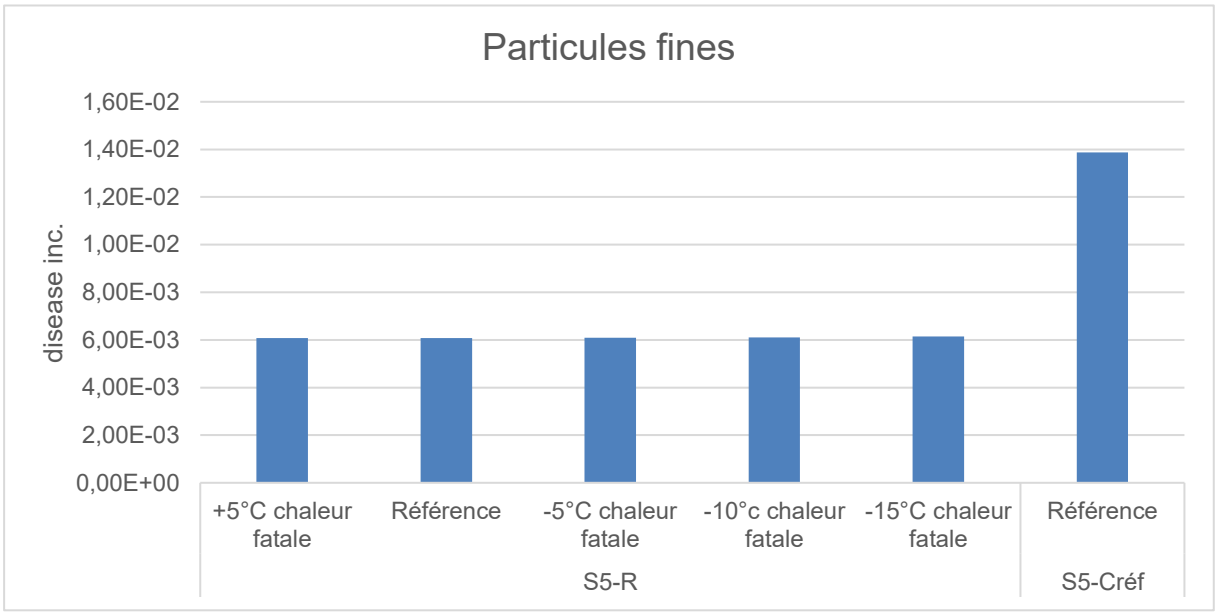


Figure 6-81 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur les particules fines

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.

Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.5.4 Toxicité humaine cancérogène

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur de toxicité humaine cancérogène en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

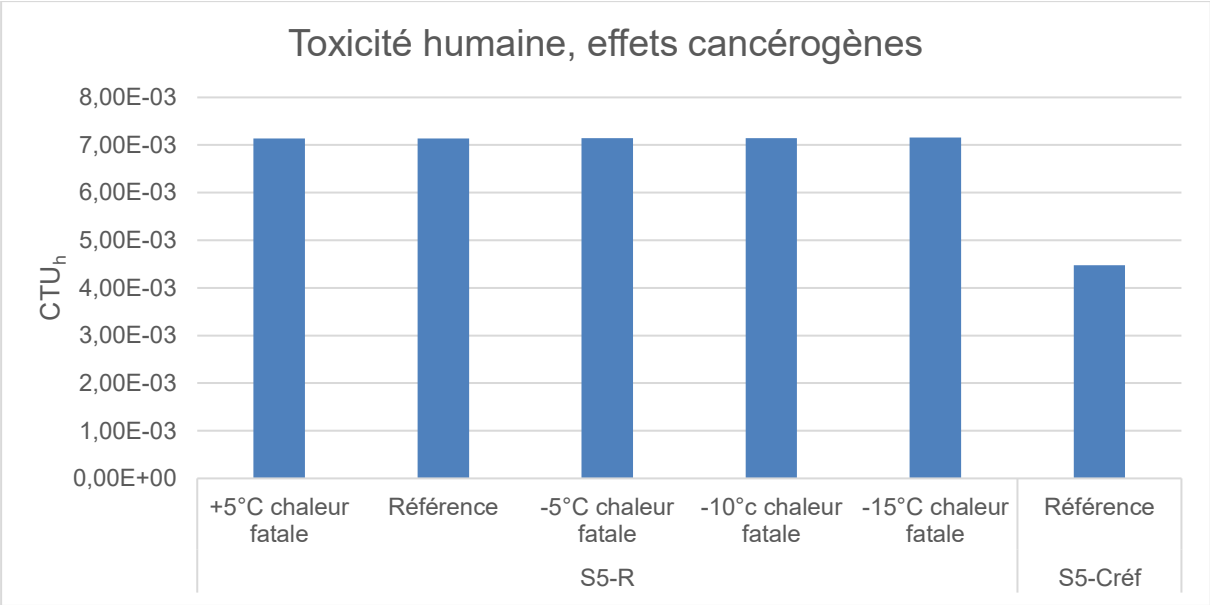


Figure 6-82 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur la toxicité humaine, effets cancérogènes

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.
Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-Créf présente toujours de meilleurs résultats que S5-R.

6.6.5.5 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

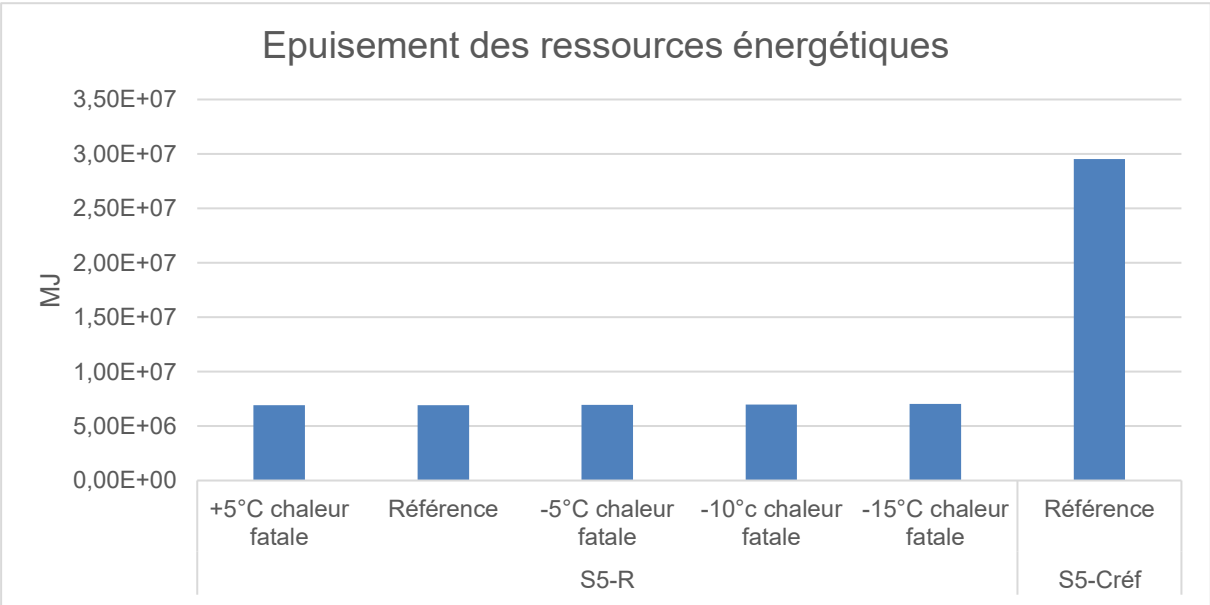


Figure 6-83 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'épuisement des ressources énergétiques

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.
Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.5.6 *Epuisement des ressources minérales et métalliques*

La figure ci-dessous fournit les résultats sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau « fatale ».

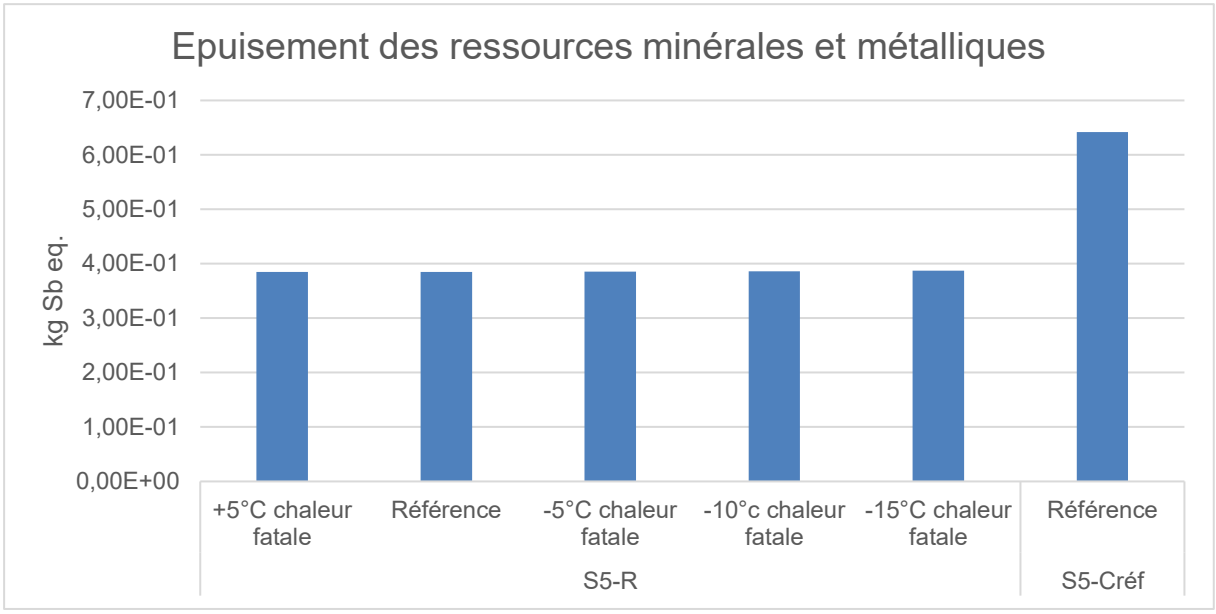


Figure 6-84 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Le scénario de référence n'est pas sensiblement modifié suite à l'abaissement ou l'augmentation des températures de la chaleur fatale.
Les conclusions globales ne sont pas modifiées : S5-R présente toujours de meilleurs résultats que S5-Créf.

6.6.6 Conclusion sur les analyses de sensibilité sur le cas d'étude 5

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 5 est présentée dans le tableau suivant. Cinq analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 5, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-26 : Cas d'étude 5 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Paramètre B (uniquement dans S5-R)	Nature du réfrigérant (uniquement dans S5-Créf)	Température de l'eau approvisionnée	Température de la source fatale (uniquement dans S5-R)
	Chauffage	ADEME	Industrie				
Changement climatique							
Acidification terrestre et d'eau douce							
Particules fines							
Toxicité humaine cancérogène							
Epuisement des ressources énergétiques							
Epuisement des ressources minérales et métalliques							

Les analyses de sensibilité dans le cas d'étude 5 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée. Le scénario S5-Créf a une consommation électrique plus importante que le scénario S5-R et le fait de modifier le mix ne permet pas un basculement entre les 2 scénarios
- **Facteur B** : la valeur du facteur B dans le scénario S5-R est un choix méthodologique important pour définir la hiérarchie entre les 2 scénarios. Dans le cas de référence, pour considérer une énergie fatale gratuite comme convenu avec l'ADEME, une valeur de B=1 est considérée. Cependant, la Commission Européenne préconise une valeur de B=0 qui a donc servi comme analyse de sensibilité. La valeur par défaut de B est toujours en cours de discussion au niveau Européen et structurera la considération des sources d'énergie fatale. Cette valeur a une influence très importante sur les résultats de plusieurs indicateurs :
    - Elle inverse la tendance entre les 2 scénarios pour l'indicateur de réchauffement climatique : le scénario S5-R devient 15 fois plus impactant que le scénario S5-Créf.
    - Pour tous les autres indicateurs analysés à l'exception de l'épuisement des ressources minérales et métalliques, le classement entre les deux systèmes est également inversé lorsque B=0, bien que l'écart entre les 2 soit bien plus faibles que pour le changement climatique.
- **Nature du réfrigérant** : un changement de la nature du réfrigérant ne modifie pas la hiérarchie entre les 2 scénarios. En effet, la contribution du réfrigérant est faible devant la consommation électrique
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas la hiérarchie entre les 2 scénarios. Le scénario conventionnel y est plus sensible mais cela ne remet pas en cause la hiérarchie observée en analyse de contributions.
- **Température de l'eau fournie par la source fatale** : la température de l'eau fournie par la source fatale est un paramètre peu sensible.

6.7 Cas d'étude 6

Pour le cas d'étude 6, 3 analyses de sensibilités ont été menées :

- Le mix considéré pour les équipements de froid : le mix par usage « chauffage », le mix vision ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix « Industrie » ont été utilisés ;
- Pour le scénario S6-R, la nature du réfrigérant est changée ;
- La température de l'eau approvisionnée.

6.7.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 6 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-27 : Cas d'étude 6 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur le mix électrique

Indicateur	Unité	S6-R				S6-Créf			
		Réf.	Usage	ADEME	Industrie	Réf.	Usage	ADEME	Industrie
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,89E+04	5,61E+04	1,90E+04	1,54E+04	4,49E+05	4,49E+05	4,49E+05	4,49E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,40E-02	1,32E-02	6,13E-03	1,34E-02	7,63E-02	7,63E-02	7,59E-02	7,63E-02
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,38E+05	9,74E+04	4,93E+04	1,52E+05	8,08E+03	8,08E+03	3,40E+03	9,26E+03
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,94E+01	1,36E+02	4,94E+01	5,24E+01	3,35E+02	3,35E+02	3,34E+02	3,34E+02
Particules fines	disease inc.	1,58E-03	1,24E-03	2,68E-03	1,05E-03	1,32E-03	1,32E-03	1,37E-03	1,30E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,92E-03	5,54E-03	4,32E-03	4,67E-03	2,59E-03	2,59E-03	2,61E-03	2,70E-03
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	6,65E-04	7,16E-04	8,69E-04	6,80E-04	5,40E-04	5,40E-04	5,51E-04	5,71E-04
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,97E+02	2,83E+02	3,40E+02	9,71E+01	3,16E+02	3,16E+02	3,23E+02	3,12E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	1,10E+01	1,67E+01	7,18E+00	7,48E+00	3,34E+00	3,34E+00	3,14E+00	3,36E+00
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,42E+01	5,22E+01	2,62E+01	2,71E+01	8,69E+01	8,69E+01	8,65E+01	8,67E+01
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	5,76E+02	5,12E+02	1,35E+03	2,13E+02	9,62E+02	9,62E+02	1,00E+03	9,44E+02
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,67E+04	1,93E+04	1,79E+04	1,64E+04	1,08E+04	1,08E+04	1,09E+04	1,13E+04
Usage des sols	Pt	3,73E+05	1,50E+05	5,97E+05	9,09E+05	6,91E+04	6,91E+04	8,08E+04	1,01E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	3,11E+04	2,66E+04	1,62E+04	3,14E+04	4,30E+03	4,30E+03	3,52E+03	4,42E+03
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	3,12E+06	2,67E+06	1,21E+06	3,23E+06	6,93E+06	6,93E+06	6,83E+06	6,95E+06
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	7,34E-02	9,12E-02	1,98E-01	7,22E-02	2,77E-02	2,77E-02	3,43E-02	3,26E-02

6.7.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

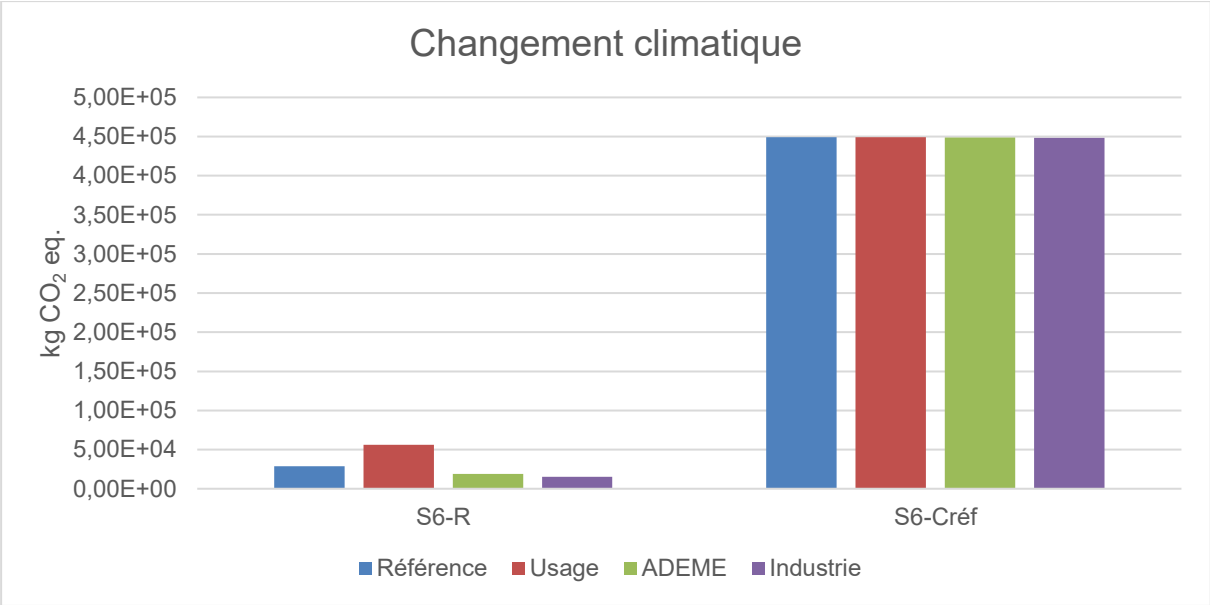


Figure 6-85 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur le changement climatique

Quel que soit le mix électrique considéré, le scénario S6-R aura un meilleur résultat que le scénario S6-Créf. Dans le cas le plus défavorable au scénario S6-R (mix « usage »), celui-ci reste 8 fois moins impactant que le scénario S6-Créf.

Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.7.1.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

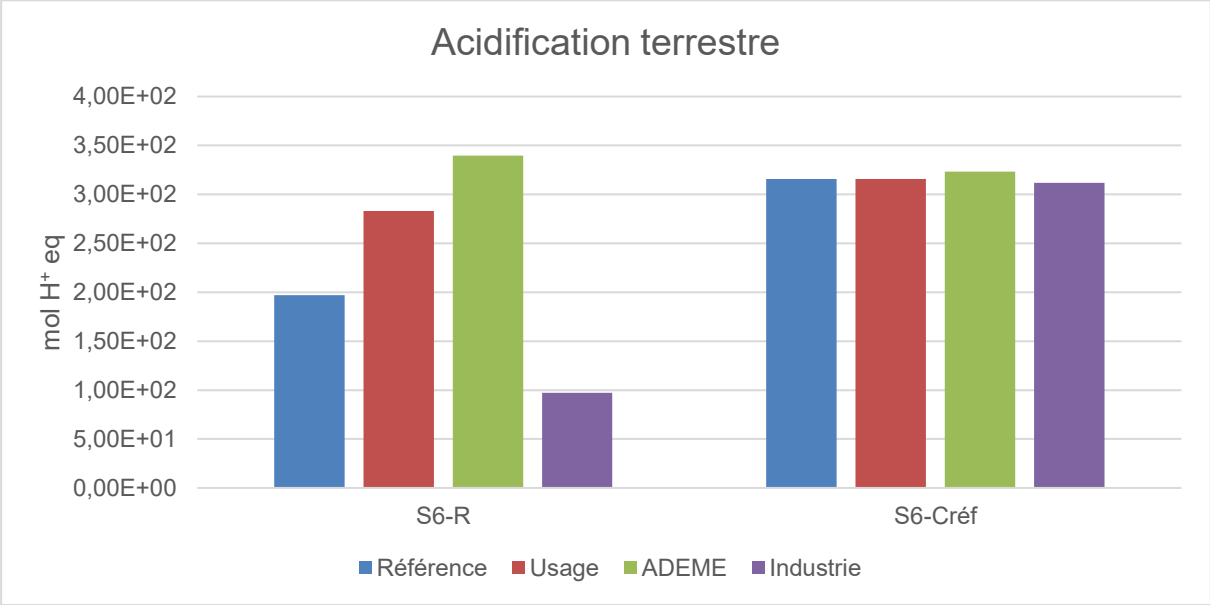


Figure 6-86 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Le mix électrique « ADEME » présente les impacts les plus hauts notamment dans le scénario S6-R à cause des émissions d'ammoniac pendant la production du biogaz utilisé en

cogénération (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Pour le scénario de référence et dans la sensibilité avec le mix « Industrie » la hiérarchie n'est pas modifiée entre les 2 scénarios : le scénario S6-R a une meilleure performance que le scénario S6-Créf ;
- Pour les analyses de sensibilité « Usage » et « ADEME », la différence dans les résultats, respectivement de 10% et 5%, ne permet pas de conclure de manière tranchée quant à la hiérarchie entre les 2 scénarios.

6.7.1.3 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

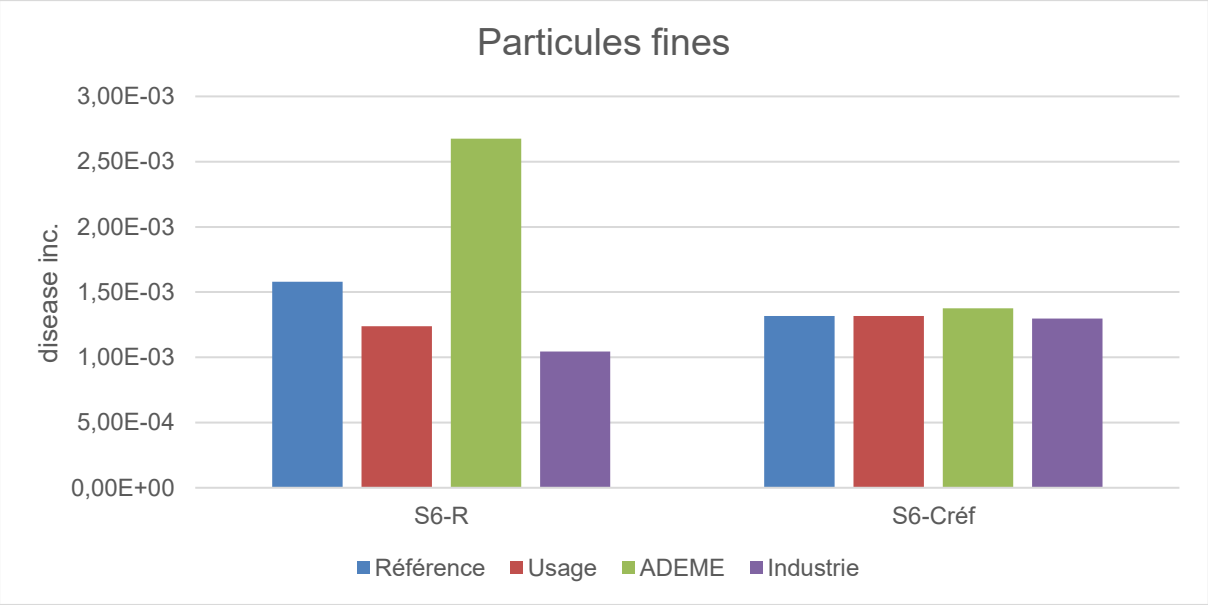


Figure 6-87 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :
- Le mix électrique « ADEME » présente les impacts les plus hauts notamment dans le scénario S6-R à cause des émissions d'ammoniac pendant la production du biogaz utilisé en cogénération (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Pour la sensibilité avec le mix « ADEME », le scénario S6-Créf devient plus intéressant
- Pour le cas de référence et les analyses de sensibilité « Usage » et « Industrie », la différence dans les résultats, respectivement de 20%, 6% et 19%, ne permet pas de conclure de manière tranchée quant à la hiérarchie entre les 2 scénarios.

6.7.1.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur de ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

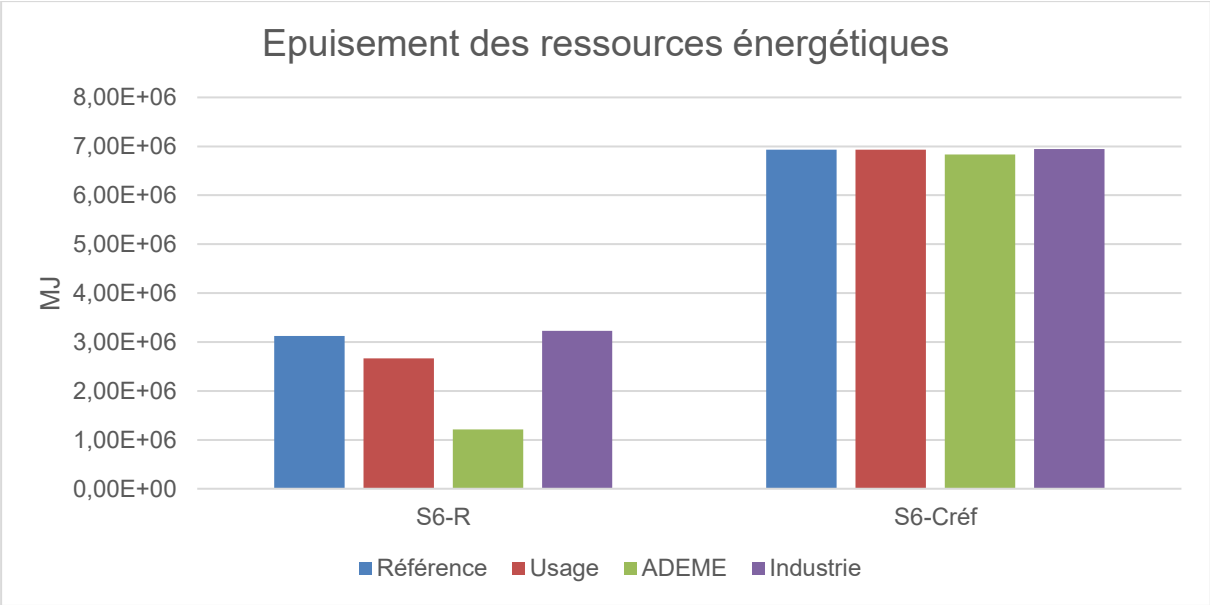


Figure 6-88 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques

Quel que soit le mix électrique considéré, le scénario S6-R aura un meilleur résultat que le scénario S6-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.7.1.5 Ressources minérales et métalliques

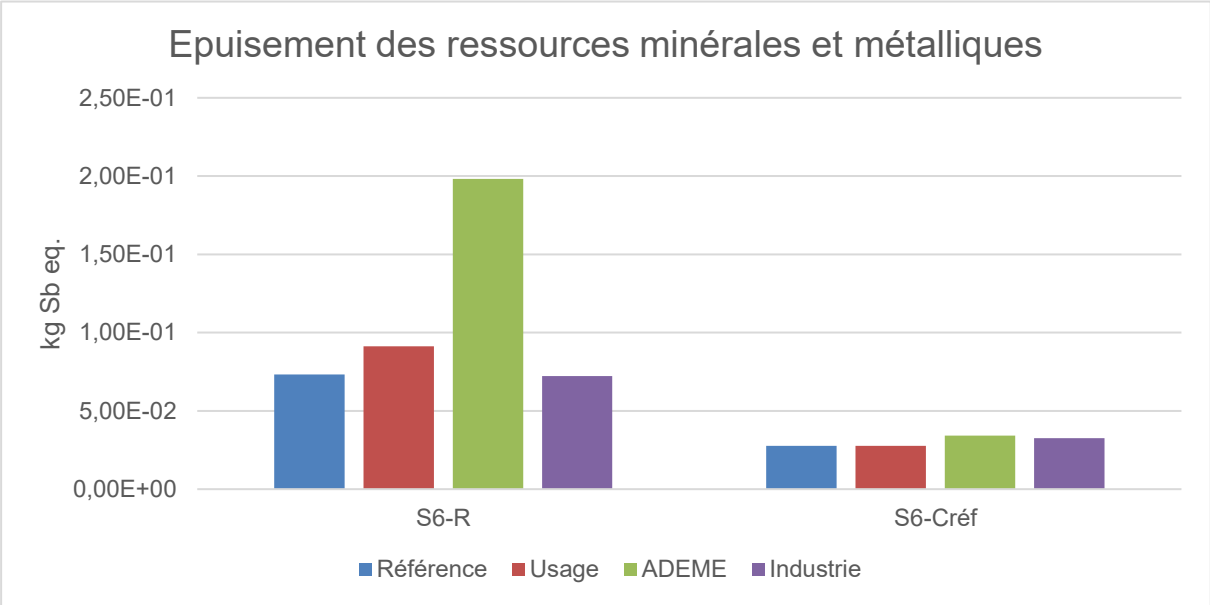


Figure 6-89 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Le scénario S6-R présente des impacts plus importants à cause de l'utilisation de métaux rares dans le mix électrique notamment des énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire. La hiérarchie et les conclusions restent les mêmes quel que soit l'alternative considérée.

6.7.2 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Cette analyse de sensibilité vise à vérifier qu'un changement du réfrigérant utilisé pour la pompe à chaleur ne modifie pas le classement par rapport à la chaudière gaz. Le changement de réfrigérant peut

impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements. Dans cette analyse de sensibilité, l'ammoniac a été remplacé par un fluide frigorigène alternatif (R134a ou R1234ze), à masse équivalente. Les autres caractéristiques du système (masse des composants, performances énergétiques) ont été supposées identiques. Cette simplification ne permet pas de comparer la performance des pompes à chaleur utilisant différents fluides frigorigènes, mais elle est acceptable compte tenu de l'objectif de comparaison avec les chaudières gaz.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant.

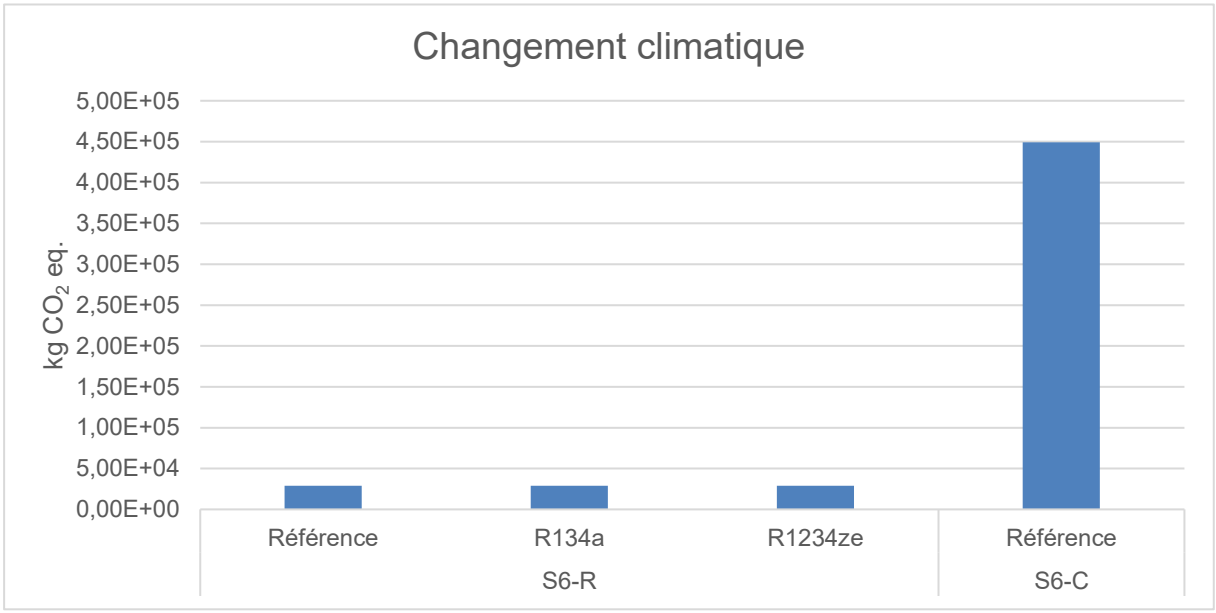


Figure 6-90 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur le changement climatique

L'analyse de sensibilité montre que quel que soit le réfrigérant utilisé dans la pompe à chaleur, le scénario S6-R aura de meilleures performances que le scénario S6-Créf dans cet indicateur.

6.7.3 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau fournie : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle 55/35°C. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 10°C :

- Scénario + 10°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 65°C / 45°C ;
- Scénario – 10°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 45°C / 25°C.

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-28 : Consommation électrique et de gaz des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée

		Référence	+10°C	-10°C
Consommation de gaz (kWh)	S6-R	0	0	0
	S6-Créf	1 773 810	1 810 027	1 739 014
Consommation d'électricité (kWh)	S6-R	253 390	306 830	230 913
	S6-Créf	0	0	0

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 6 sur chacun des impacts midpoint considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-29 : Cas d'étude 6 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Indicateur	Unité	S6-R			S6-Créf		
		+10°C	Référence	-10°C	+10°C	Référence	-10°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	3,43E+04	2,89E+04	2,66E+04	4,58E+05	4,49E+05	4,40E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,68E-02	1,40E-02	1,29E-02	7,79E-02	7,63E-02	7,48E-02
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,66E+05	1,38E+05	1,27E+05	8,19E+03	8,08E+03	7,98E+03
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	8,16E+01	6,94E+01	6,42E+01	3,42E+02	3,35E+02	3,28E+02
Particules fines	disease inc.	1,86E-03	1,58E-03	1,46E-03	1,34E-03	1,32E-03	1,29E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	4,49E-03	3,92E-03	3,67E-03	2,64E-03	2,59E-03	2,54E-03
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	7,45E-04	6,65E-04	6,31E-04	5,51E-04	5,40E-04	5,30E-04
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	2,34E+02	1,97E+02	1,81E+02	3,22E+02	3,16E+02	3,10E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	1,29E+01	1,10E+01	1,02E+01	3,40E+00	3,34E+00	3,28E+00
Eutrophisation, marine	kg N eq	4,04E+01	3,42E+01	3,15E+01	8,87E+01	8,69E+01	8,52E+01
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	6,84E+02	5,76E+02	5,31E+02	9,82E+02	9,62E+02	9,44E+02
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,92E+04	1,67E+04	1,57E+04	1,10E+04	1,08E+04	1,06E+04
Usage des sols	Pt	4,44E+05	3,73E+05	3,43E+05	7,03E+04	6,91E+04	6,79E+04
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	3,71E+04	3,11E+04	2,85E+04	4,37E+03	4,30E+03	4,23E+03
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	3,74E+06	3,12E+06	2,86E+06	7,07E+06	6,93E+06	6,80E+06
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	8,48E-02	7,34E-02	6,86E-02	2,82E-02	2,77E-02	2,73E-02

6.7.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

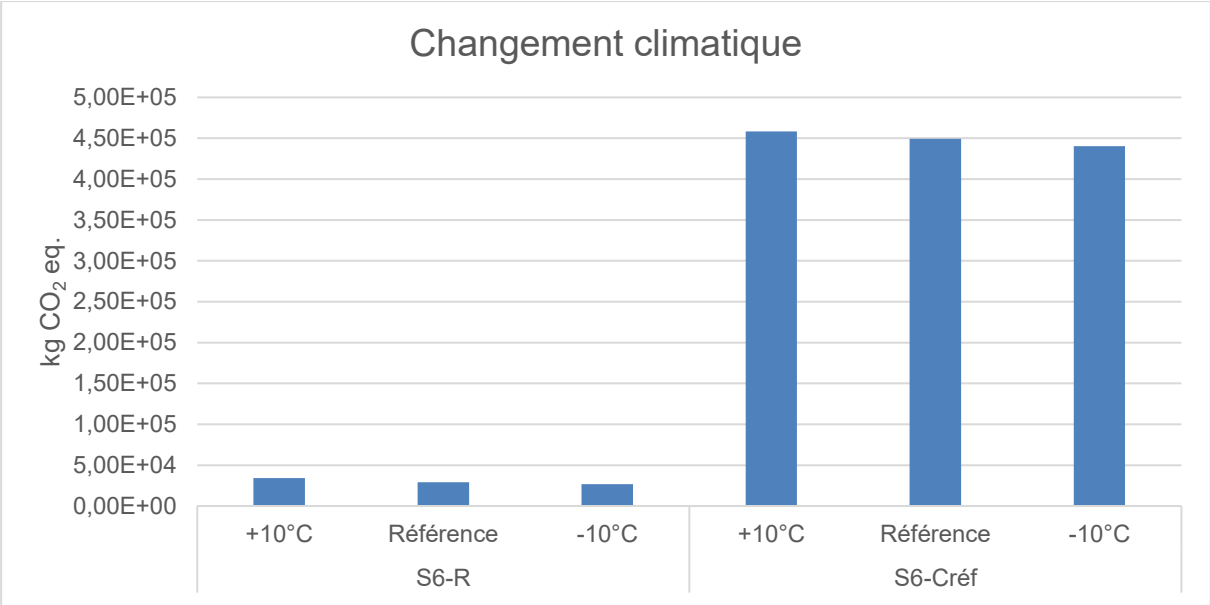


Figure 6-91 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur le changement climatique

Le scénario S6-R aura de meilleures performances que le scénario S6-Créf même si la température de l'eau approvisionnée monte ou descend de 10°C. La conclusion générale n'est pas modifiée.

6.7.3.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 6 sur l'indicateur d'acidification terrestre et d'eau douce en faisant varier la température de l'eau approvisionnée.

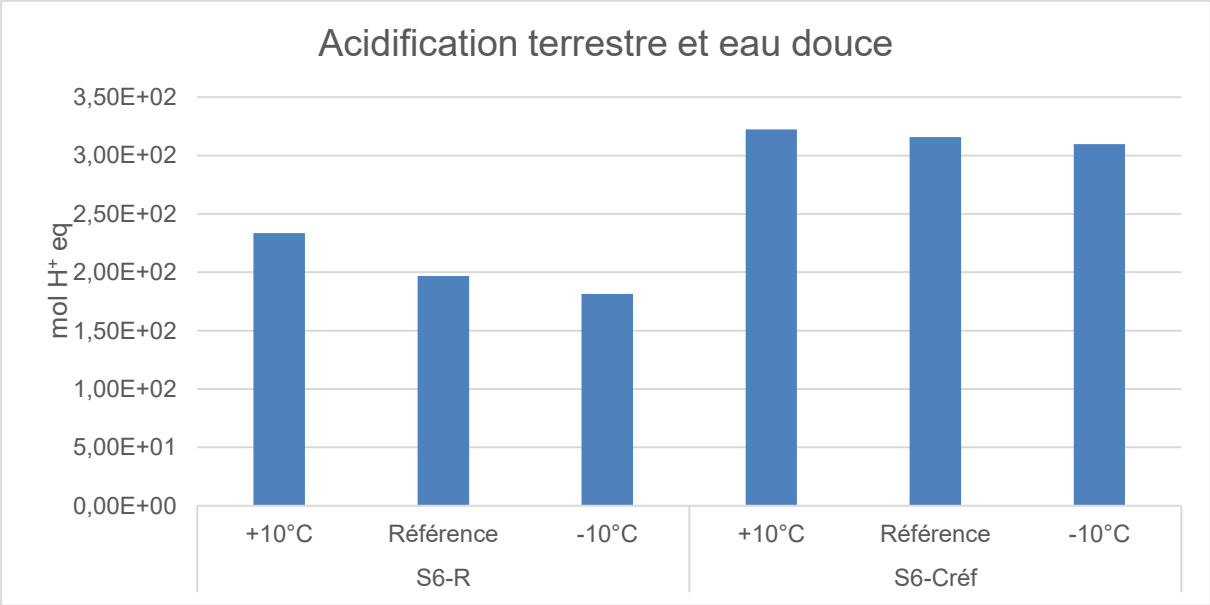


Figure 6-92 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'acidification terrestre et eau douce

Le scénario S6-R aura de meilleures performances que le scénario S6-Créf même si la température de l'eau approvisionnée monte ou descend de 10°C. La conclusion générale n'est pas modifiée.

6.7.3.3 Particules fines

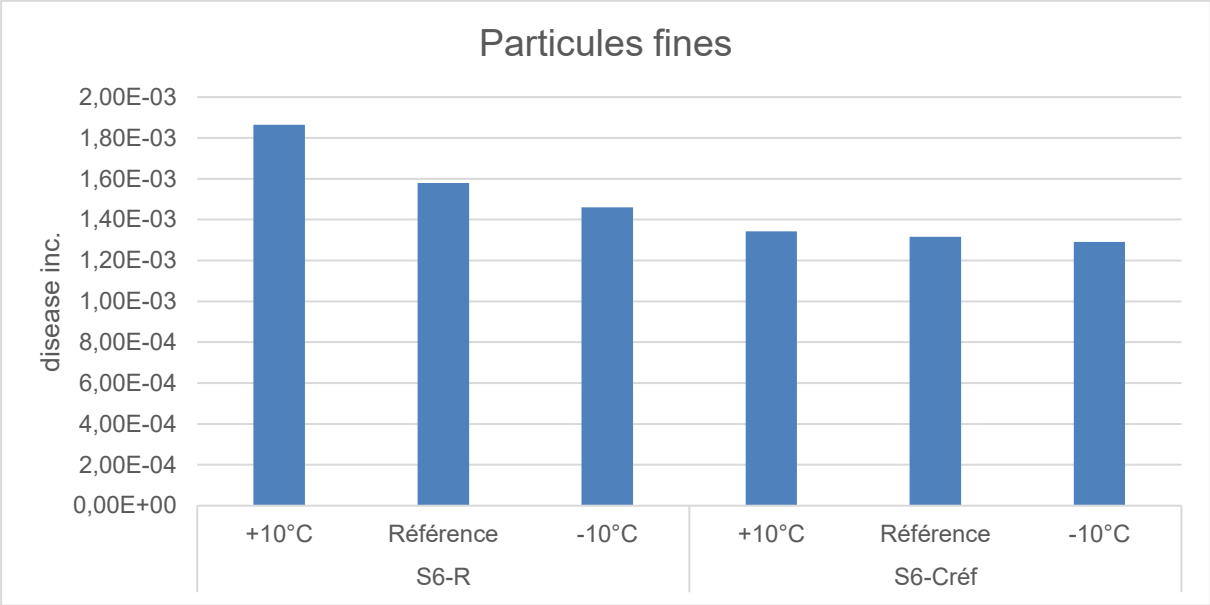


Figure 6-93 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les particules fines

Le scénario S6-Créf présente de meilleurs résultats que le scénario S6-R même si la température de l'eau approvisionnée monte ou descend de 10°C. Cependant, la différence entre les 2 scénarios est inférieure à 30%, il n'est donc pas possible de trancher de manière catégorique de la hiérarchie entre les 2 scénarios dans cet indicateur.

6.7.3.4 Ressources énergétiques

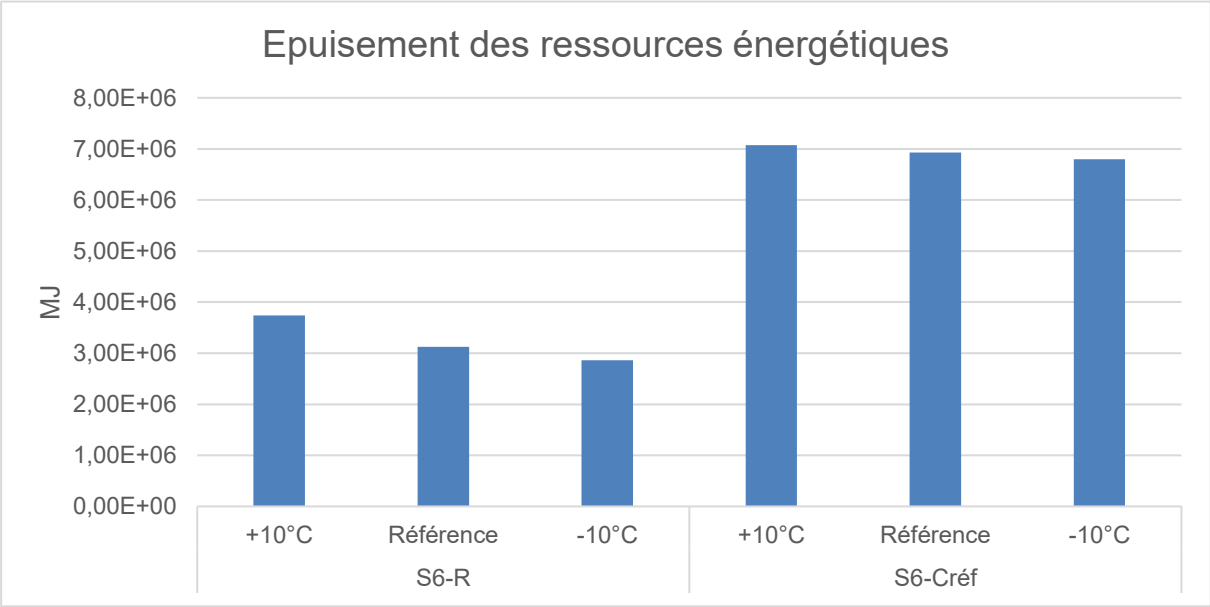


Figure 6-94 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources énergétiques

Le scénario S6-R aura de meilleures performances que le scénario S6-Créf même si la température de l'eau approvisionnée monte ou descend de 10°C. La conclusion générale n'est pas modifiée.

6.7.3.5 *Ressources minérales et métalliques*

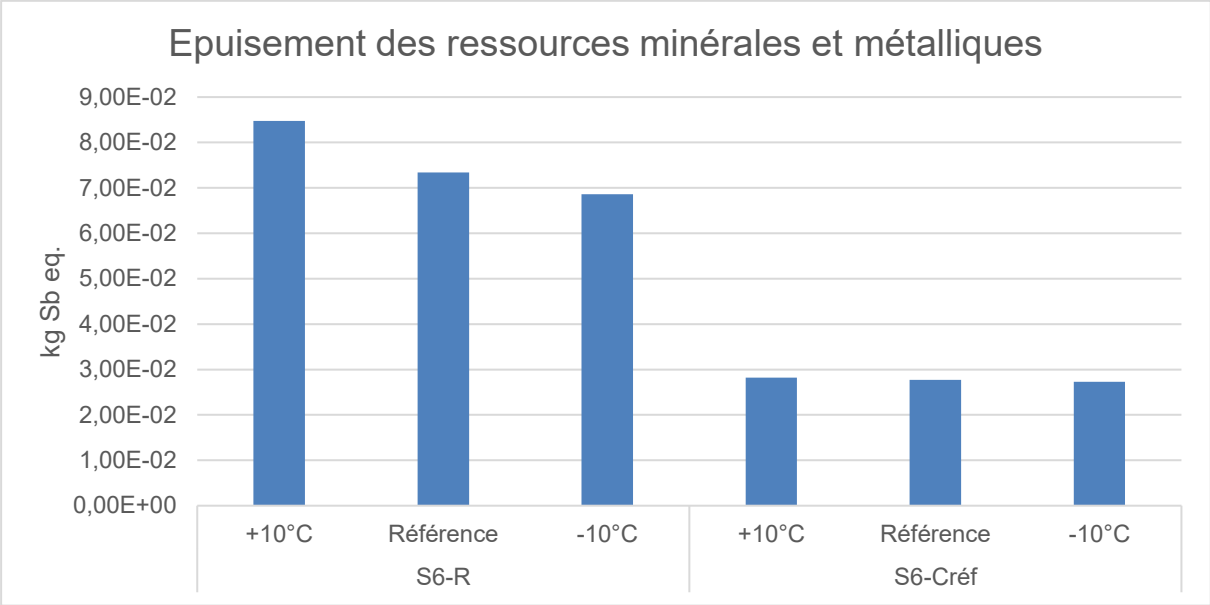


Figure 6-95 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Le scénario S6-CRéf aura de meilleures performances que le scénario S6-R même si la température de l'eau approvisionnée monte ou descend de 10°C. La conclusion générale n'est pas modifiée.

6.7.4 Conclusion sur les analyses de sensibilité du cas d'étude 6

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 6 est présentée dans le tableau suivant. Trois analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 6, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-30 : Cas d'étude 6 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix électrique			Nature du réfrigérant	Température de l'eau approvisionnée
	Usage	ADEME	Industrie		
Changement climatique					
Acidification terrestre et d'eau douce					
Particules fines					

Epuisement des ressources énergétiques					
Epuisement des ressources minérales et métalliques					

Les analyses de sensibilité dans le scénario 6 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : une variation du mix électrique peut avoir une influence sur les conclusions pour certains indicateurs. Dans le cas des indicateurs « acidification terrestre et d'eau douce » et « particules fines » la hiérarchie peut s'inverser notamment avec l'utilisation du mix « ADEME » à cause des émissions d'ammoniac de la filière biogaz (émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat).
- **Nature du réfrigérant** : un changement de la nature du réfrigérant ne modifie pas la hiérarchie entre les 2 scénarios. En effet, la contribution du réfrigérant est faible devant la consommation énergétique.
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas la hiérarchie entre les 2 scénarios.

6.8 Cas d'étude 7

Pour le cas d'étude 7, 3 analyses de sensibilités ont été menées :

- Le mix considéré pour les équipements de chaud : le mix par usage « chauffage », le mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix « Industrie » ont été utilisés ;
- Pour le scénario S7-R, la valeur du facteur B dans la formule CFF devient égale à 0
- La température de l'eau approvisionnée avec une variation de +/- 5°C.

6.8.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-31 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S7-R				S7-Créf			
		Référence	Usage	ADEME	Industrie	Référence	Usage	ADEME	Industrie
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,71E+05	5,57E+05	1,72E+05	1,36E+05	3,14E+06	3,14E+06	3,14E+06	3,14E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,38E-01	1,29E-01	5,94E-02	1,31E-01	5,32E-01	5,32E-01	5,31E-01	5,32E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,37E+06	9,38E+05	4,87E+05	1,50E+06	3,75E+04	3,75E+04	1,70E+04	4,27E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,17E+02	1,32E+03	4,20E+02	4,45E+02	2,34E+03	2,34E+03	2,33E+03	2,33E+03
Particules fines	disease inc.	1,50E-02	1,14E-02	2,59E-02	9,59E-03	9,01E-03	9,01E-03	9,26E-03	8,93E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,08E-02	4,80E-02	3,48E-02	3,75E-02	1,76E-02	1,76E-02	1,77E-02	1,81E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	4,31E-03	4,85E-03	6,33E-03	4,10E-03	3,73E-03	3,73E-03	3,77E-03	3,86E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,94E+03	2,85E+03	3,36E+03	9,37E+02	2,19E+03	2,19E+03	2,22E+03	2,17E+03

Indicateur	Unité	S7-R				S7-Créf			
		Référence	Usage	ADEME	Industrie	Référence	Usage	ADEME	Industrie
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	9,89E+01	1,59E+02	6,11E+01	6,16E+01	2,18E+01	2,18E+01	2,09E+01	2,19E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,19E+02	5,09E+02	2,40E+02	2,47E+02	6,04E+02	6,04E+02	6,02E+02	6,03E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	5,86E+03	5,18E+03	1,36E+04	2,24E+03	6,66E+03	6,66E+03	6,84E+03	6,58E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,30E+05	1,57E+05	1,41E+05	1,20E+05	7,37E+04	7,37E+04	7,40E+04	7,59E+04
Usage des sols	Pt	3,57E+06	1,22E+06	5,79E+06	8,85E+06	4,33E+05	4,33E+05	4,85E+05	5,71E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	3,04E+05	2,57E+05	1,57E+05	3,06E+05	2,58E+04	2,58E+04	2,24E+04	2,64E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	3,08E+07	2,59E+07	1,18E+07	3,17E+07	4,81E+07	4,81E+07	4,77E+07	4,82E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,17E-01	8,05E-01	1,85E+00	5,47E-01	1,73E-01	1,73E-01	2,01E-01	1,94E-01

6.8.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur changement climatique :

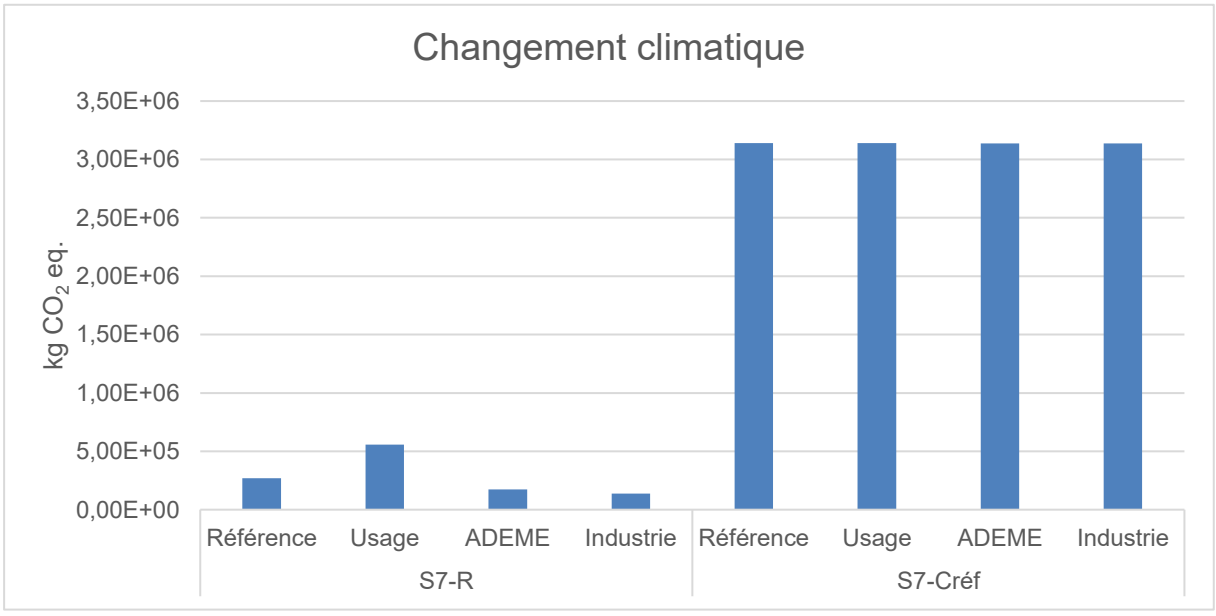


Figure 6-96 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur le changement climatique

Quel que soit le mix considéré, le scénario S7-R est plus performant dans l'indicateur changement climatique. L'utilisation de gaz est bien plus impactant que celle d'électricité pour cet indicateur.

Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.8.1.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce.

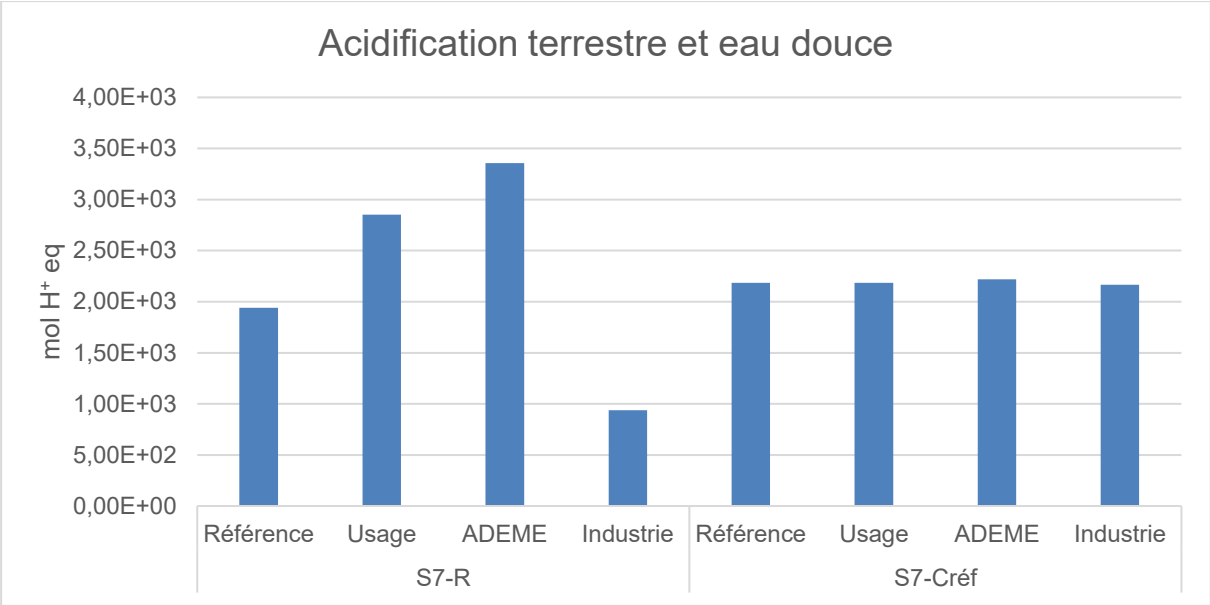


Figure 6-97 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'acidification terrestre et eau douce

Une variation du mix électrique considéré peut modifier la hiérarchie entre les 2 scénarios. Dans le cas des mix Usage et ADEME, les impacts proviennent respectivement de l'utilisation de charbon et de biogaz. Au contraire, l'utilisation du mix industrie permet de diminuer les impacts du scénario S7-R le rendant ainsi deux fois plus performant que S7-Créf.

6.8.1.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur de particules fines.

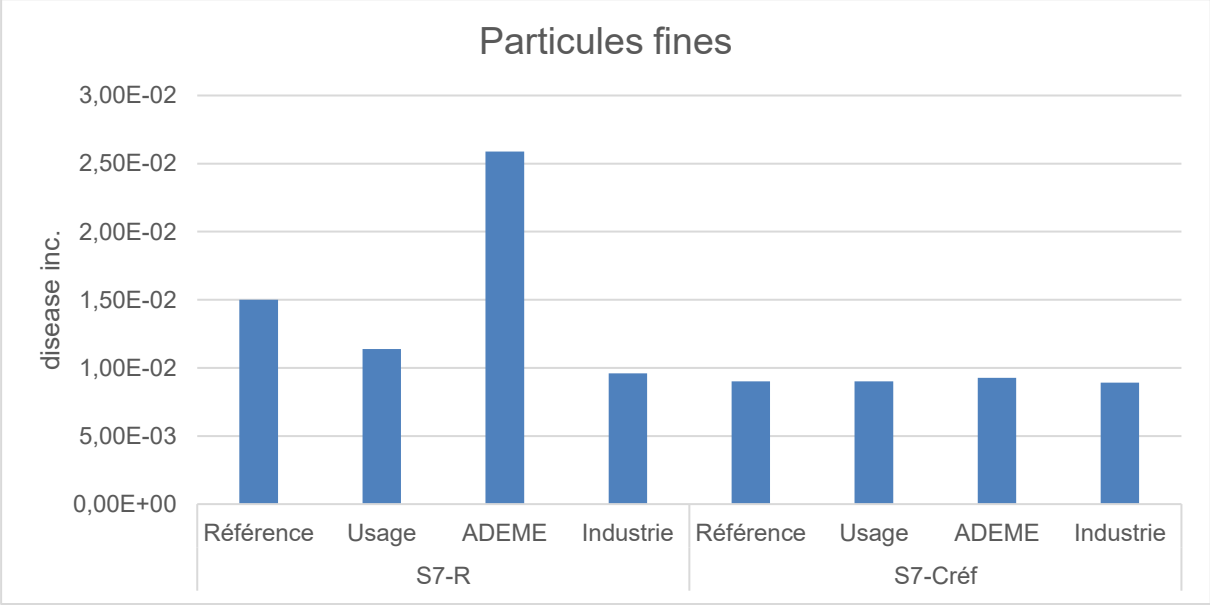


Figure 6-98 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines

Globalement, S7-Créf parait plus performant que S7-R quel que soit le mix électrique considéré notamment dans le cas du mix ADEME où les émissions d'ammoniac de la production de biogaz sont les principales contributrices de l'impact (hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat). Cependant, pour les mix « Usage » et « Industrie » la différence entre les deux

alternatives est inférieure à 30% : en prenant en compte l'incertitude sur cet indicateur, on ne peut pas trancher de manière catégorique.

6.8.1.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur de ressources énergétiques.

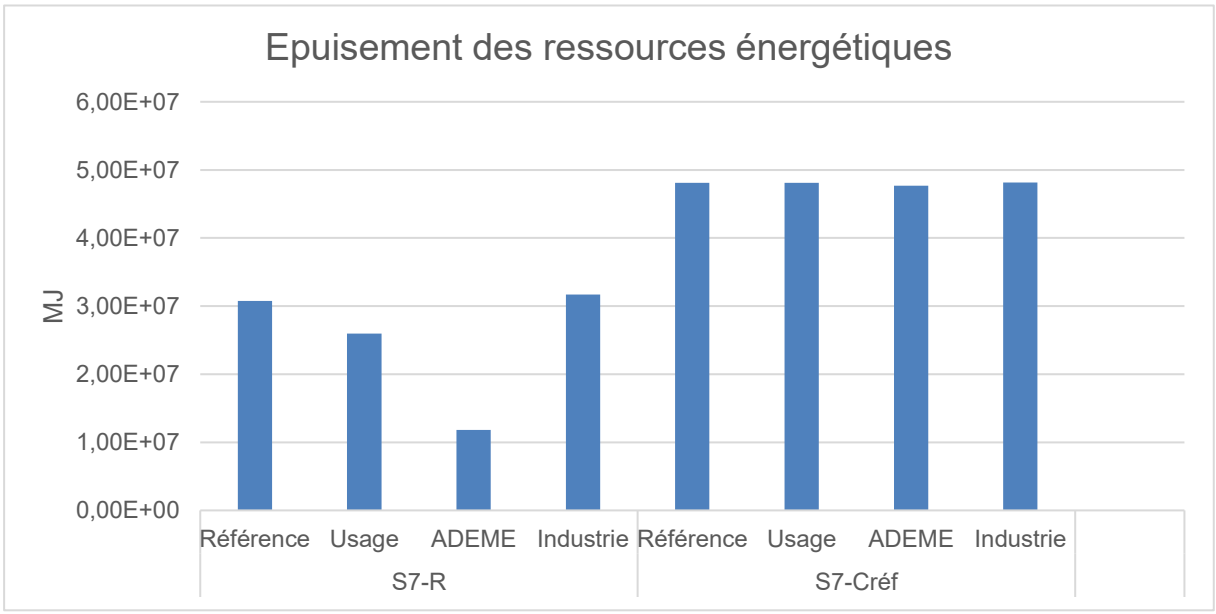


Figure 6-99 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S7-R est plus performant que le S7-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.8.1.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

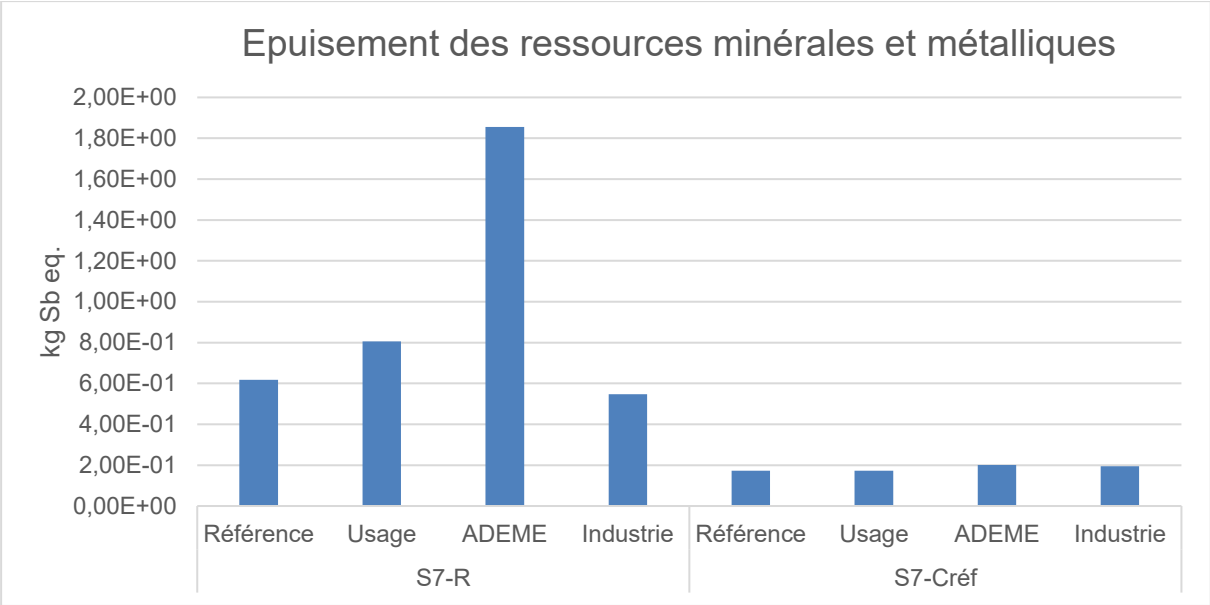


Figure 6-100 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S7-Cref est plus performant que le S7-R. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.8.2 Analyse de sensibilité sur la valeur du coefficient d'allocation énergétique B

Dans la formule de fin de vie présentée précédemment, un facteur B est introduit pour allouer entre producteur et utilisateur les impacts et crédits de l'incinération. Ce facteur B est égal à 1 dans le rapport, ce qui permet de considérer l'énergie fatale en entrée comme étant gratuite. Cependant, les recommandations de PEF v6.3 à l'échelle européenne, promeuvent un coefficient B égal à 0, se traduisant par des impacts et crédits de l'incinération imputés au producteur de matériau. Dans ce cas, l'énergie issue de l'incinération qui est utilisée par un utilisateur ultérieur doit être comptabilisée comme de l'énergie primaire fossile, ici approximée par du gaz naturel.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-32 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité du coefficient d'allocation énergétique B sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S7-R		S7-Créf	
		B=1 Référence	B=0	B=1 Référence	B=0
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,71E+05	2,36E+06	3,14E+06	3,14E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,38E-01	2,51E-01	5,32E-01	5,32E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,37E+06	1,39E+06	3,75E+04	3,75E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,17E+02	1,43E+03	2,34E+03	2,34E+03
Particules fines	disease inc.	1,50E-02	1,88E-02	9,01E-03	9,01E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,08E-02	3,54E-02	1,76E-02	1,76E-02

Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	4,31E-03	5,19E-03	3,73E-03	3,73E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,94E+03	2,64E+03	2,19E+03	2,19E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	9,89E+01	1,05E+02	2,18E+01	2,18E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,19E+02	5,54E+02	6,04E+02	6,04E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	5,86E+03	8,47E+03	6,66E+03	6,66E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,30E+05	1,47E+05	7,37E+04	7,37E+04
Usage des sols	Pt	3,57E+06	3,70E+06	4,33E+05	4,33E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	3,04E+05	3,13E+05	2,58E+04	2,58E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	3,08E+07	4,12E+07	4,81E+07	4,81E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,17E-01	6,59E-01	1,73E-01	1,73E-01

6.8.2.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le facteur B pour l'indicateur changement climatique :

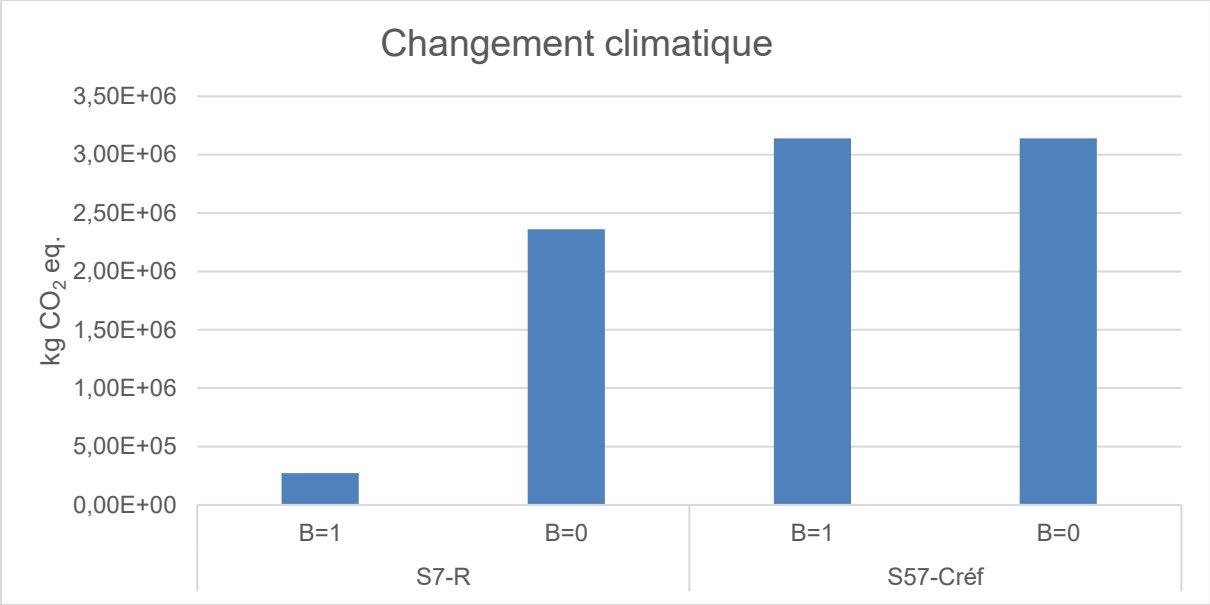


Figure 6-101 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur le changement climatique

Si l'on considère une valeur B=0 alors l'impact du scénario S7-R va augmenter d'un facteur 11. Cependant, ce scénario restera toujours plus performant que le S7-Cref. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.8.2.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le facteur B pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

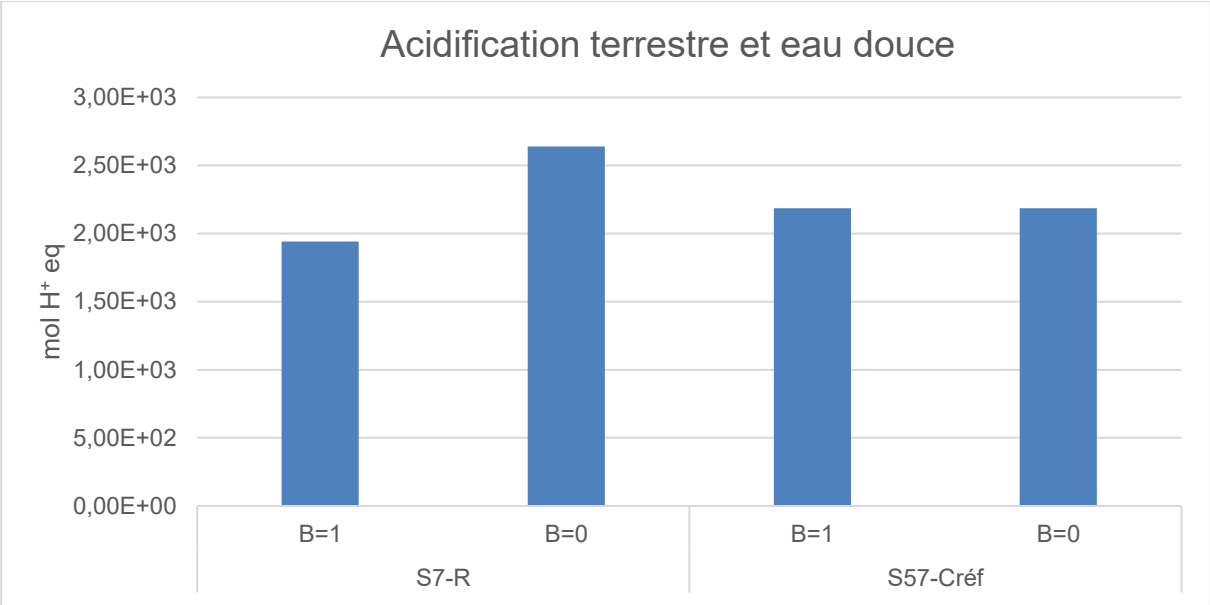


Figure 6-102 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'acidification terrestre et eau douce

Lorsque B prend la valeur 0 alors la différence entre les 2 scénarios est trop peu significative compte tenu de l'incertitude liée à cet indicateur. La valeur de B peut modifier la hiérarchie des scénarios mais aucune conclusion définitive ne peut être tirée.

6.8.2.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le facteur B pour l'indicateur des particules fines :

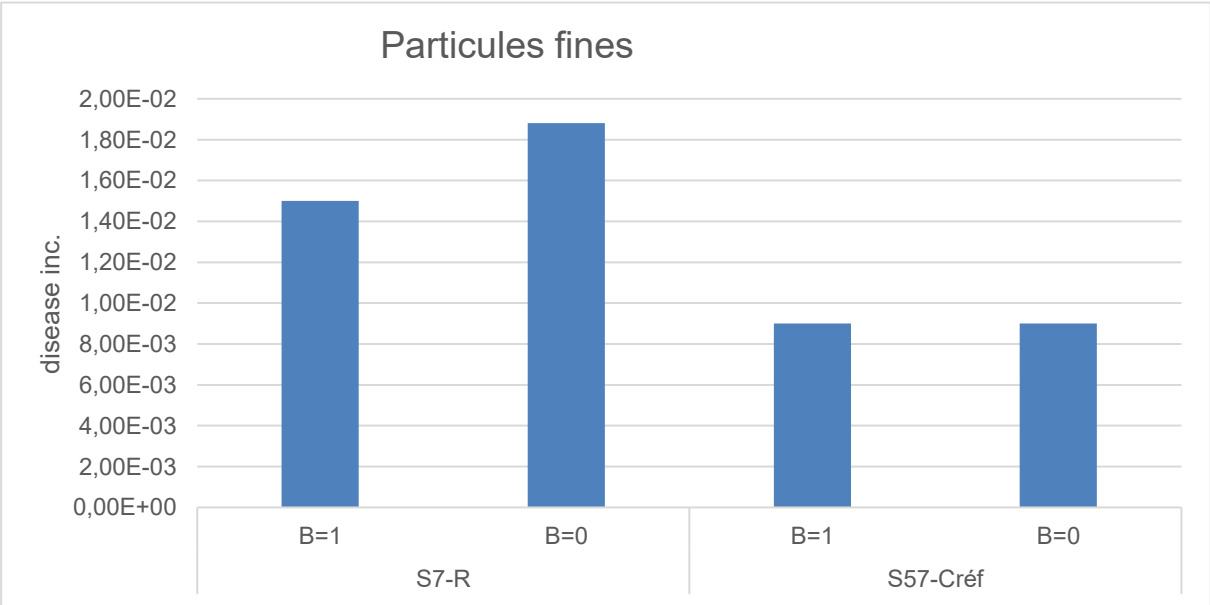


Figure 6-103 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur les particules fines

Quelle que soit la valeur de B considérée, le scénario S7-Créf est plus performant que S7-R. Les conclusions générales sur cet indicateur ne sont donc pas modifiées.

6.8.2.4 *Ressources énergétiques*

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le facteur B pour l'indicateur des ressources énergétiques :

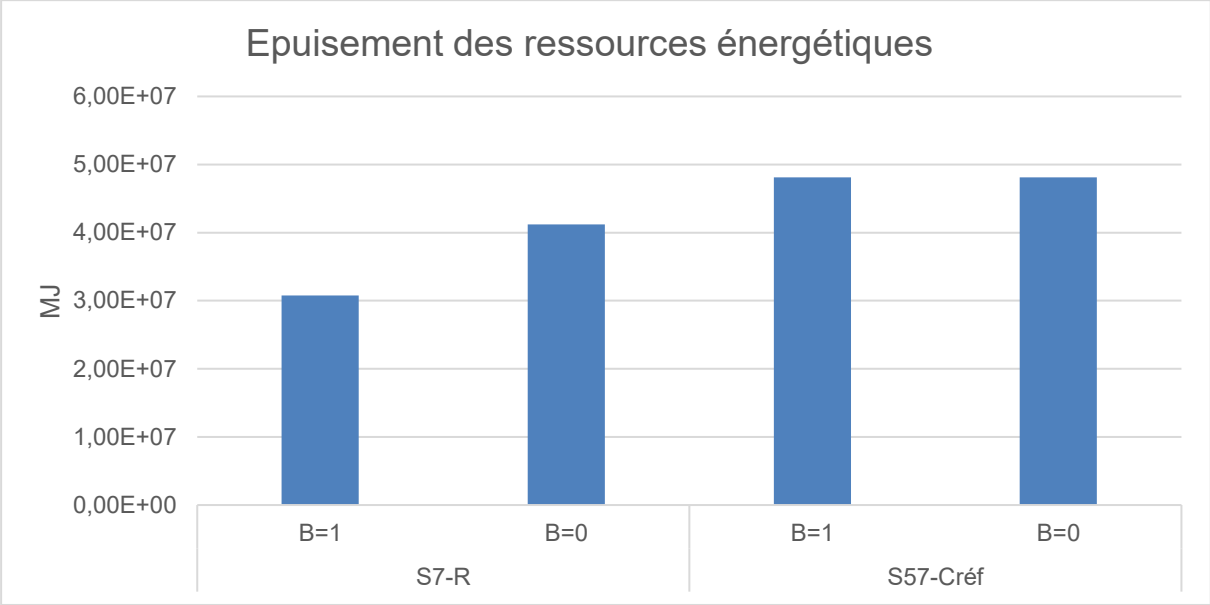


Figure 6-104 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'épuisement des ressources énergétiques

Quelle que soit la valeur de B considérée, le scénario S7-R est plus performant que S7-Créf. Les conclusions générales sur cet indicateur ne sont donc pas modifiées.

6.8.2.5 *Ressources minérales et métalliques*

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le facteur B pour l'indicateur des ressources énergétiques :

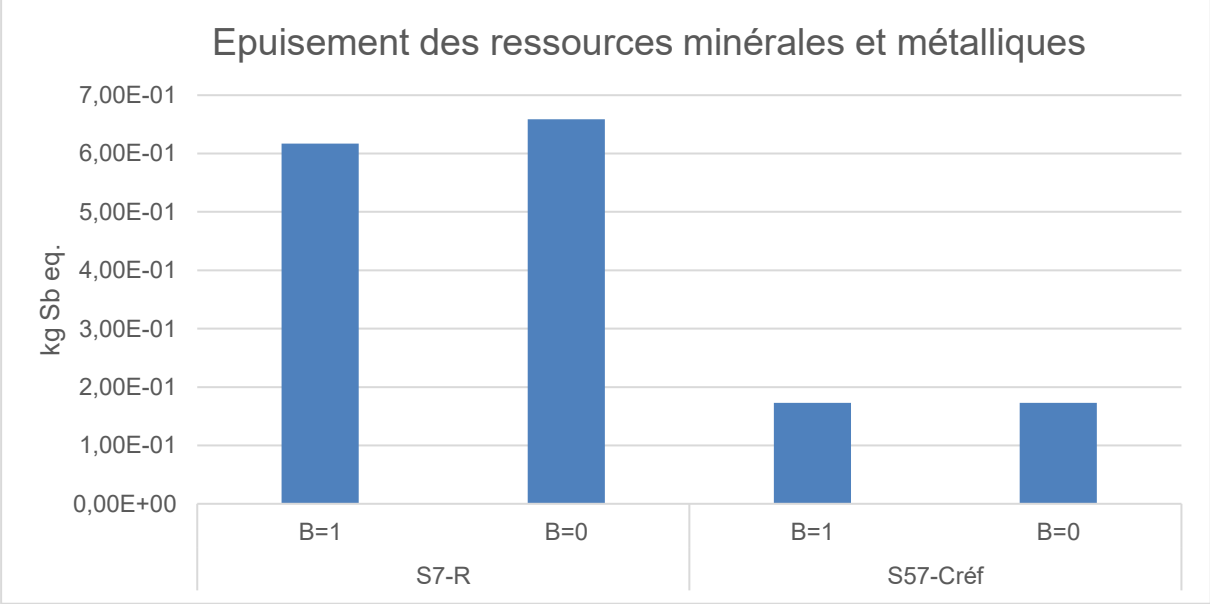


Figure 6-105 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Quelle que soit la valeur de B considérée, le scénario S7-Cref est plus performant que S7-R. Les conclusions générales sur cet indicateur ne sont donc pas modifiées.

6.8.3 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau fournie : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle 92/55°C. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 5°C :

- Scénario + 5°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 97°C / 62°C.;
- Scénario – 5°C : la consommation énergétique est calculée pour un circuit secondaire avec une boucle 87°C / 50°C.

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-33 : Consommation électrique, de gaz et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée

		Référence	+5°C	-5°C
Consommation de gaz (kWh)	S7-R	0	0	0
	S7-Créf	12 417 501	12 445 846	12 389 284
Consommation d'électricité (kWh)	S7-R	2 672 136	2 928 918	2 408 221
	S7-Créf	0	0	0
Consommation d'énergie fatale (kWh)	S7-R	9 352 476	9 095 695	9 616 391
	S7-Créf	0	0	0

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-34 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S7-R			S7-Créf		
		+5°C	Référence	-5°C	+5°C	Référence	-5°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,97E+05	2,71E+05	2,44E+05	3,14E+06	3,14E+06	3,13E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,51E-01	1,38E-01	1,24E-01	5,32E-01	5,32E-01	5,31E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,50E+06	1,37E+06	1,23E+06	3,75E+04	3,75E+04	3,75E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	6,76E+02	6,18E+02	5,57E+02	2,34E+03	2,34E+03	2,33E+03
Particules fines	disease inc.	1,64E-02	1,50E-02	1,36E-02	9,01E-03	9,01E-03	8,99E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	3,36E-02	3,08E-02	2,80E-02	1,76E-02	1,76E-02	1,76E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	4,71E-03	4,32E-03	3,93E-03	3,73E-03	3,73E-03	3,72E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	5,00E+00	1,94E+03	1,76E+03	2,19E+03	2,19E+03	2,18E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	1,08E+02	9,90E+01	8,94E+01	2,18E+01	2,18E+01	2,17E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,49E+02	3,19E+02	2,88E+02	6,04E+02	6,04E+02	6,02E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	6,38E+03	5,86E+03	5,32E+03	6,66E+03	6,66E+03	6,64E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,42E+05	1,30E+05	1,18E+05	7,37E+04	7,37E+04	7,36E+04
Usage des sols	Pt	3,91E+06	3,57E+06	3,22E+06	4,33E+05	4,33E+05	4,32E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	3,33E+05	3,04E+05	2,74E+05	2,58E+04	2,58E+04	2,58E+04

Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	3,37E+07	3,08E+07	2,77E+07	4,81E+07	4,81E+07	4,80E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,74E-01	6,19E-01	5,63E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,72E-01

6.8.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée pour l'indicateur changement climatique :

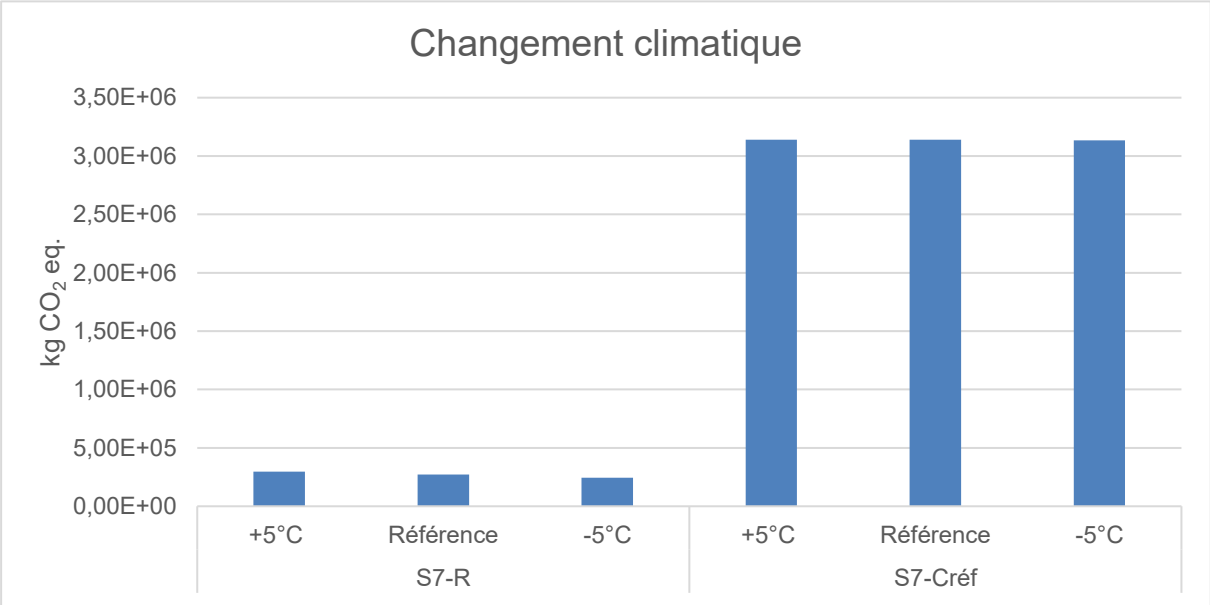


Figure 6-106 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur le changement climatique

Un changement de température de l'eau approvisionnée de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-R est plus performant sur l'indicateur changement climatique.

6.8.3.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

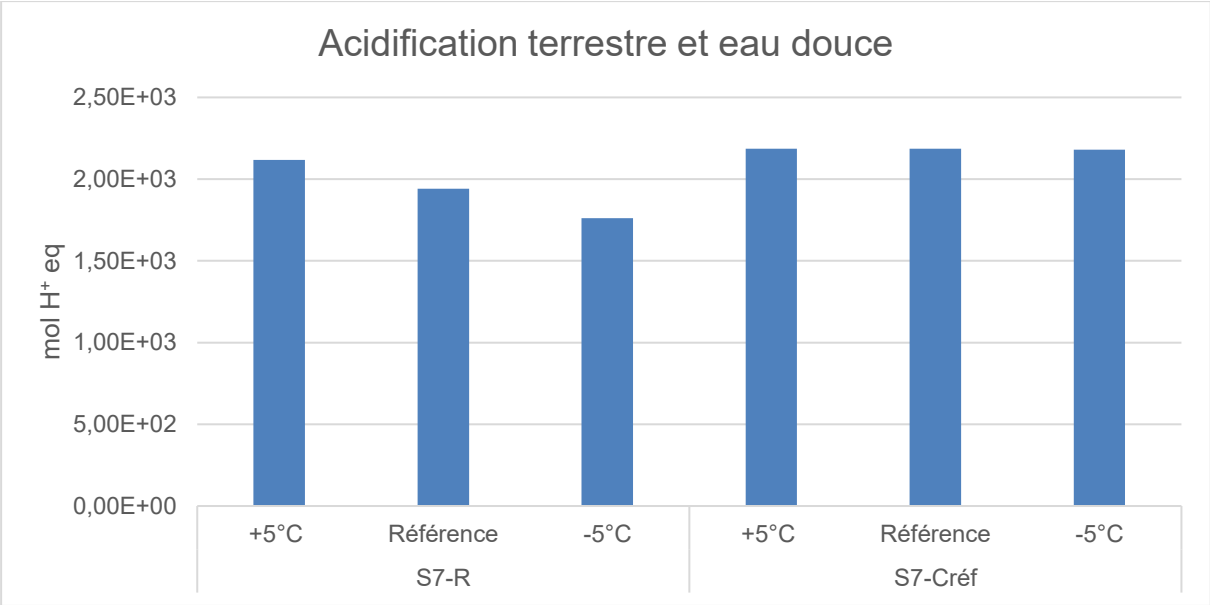


Figure 6-107 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'acidification terrestre et eau douce

Une variation de +/-5°C de la température de l'eau approvisionnée induit une augmentation ou une diminution de 10% sur les résultats de S7-R. Cependant, il n'est pas possible de trancher entre les 2 scénarios étant donné que la différence de résultats est inférieure à 30% qui est le seuil d'incertitude sur cet indicateur.

6.8.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée pour l'indicateur de particules fines :

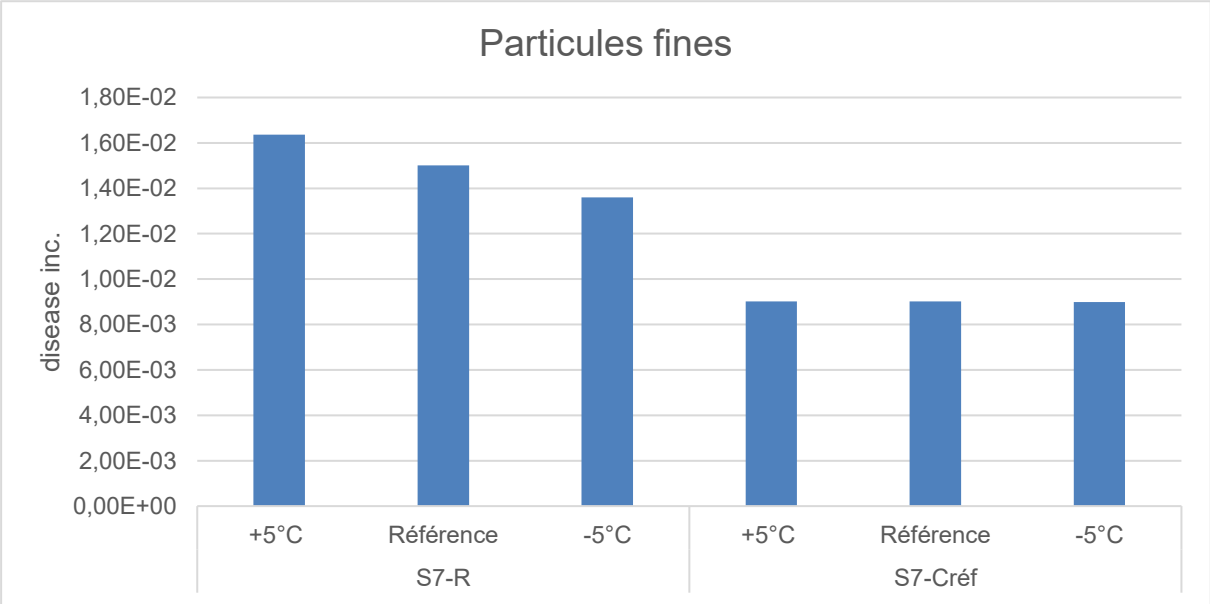


Figure 6-108 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les particules fines

Un changement de température de l'eau approvisionnée de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-Cref est plus performant sur l'indicateur de particules fines.

6.8.3.4 *Ressources énergétiques*

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée pour l'indicateur de ressources énergétiques :

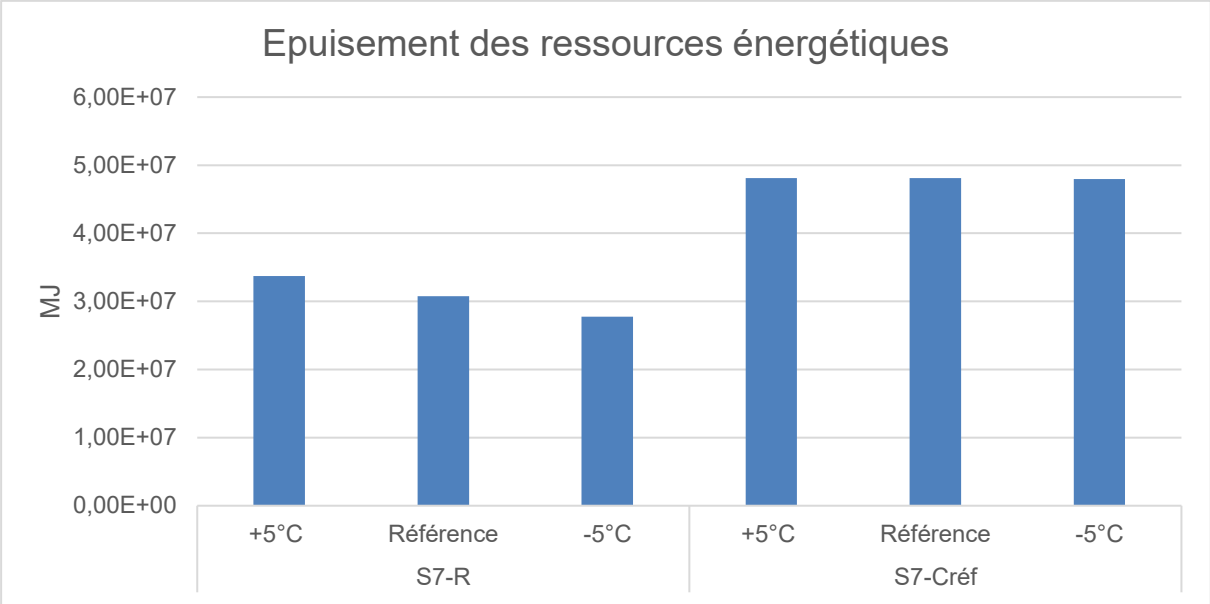


Figure 6-109 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources énergétiques

Un changement de température de l'eau approvisionnée de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-R est plus performant sur l'indicateur de ressources énergétiques.

6.8.3.5 *Ressources minérales et métalliques*

Un changement de température de l'eau approvisionnée de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-Cref est plus performant sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

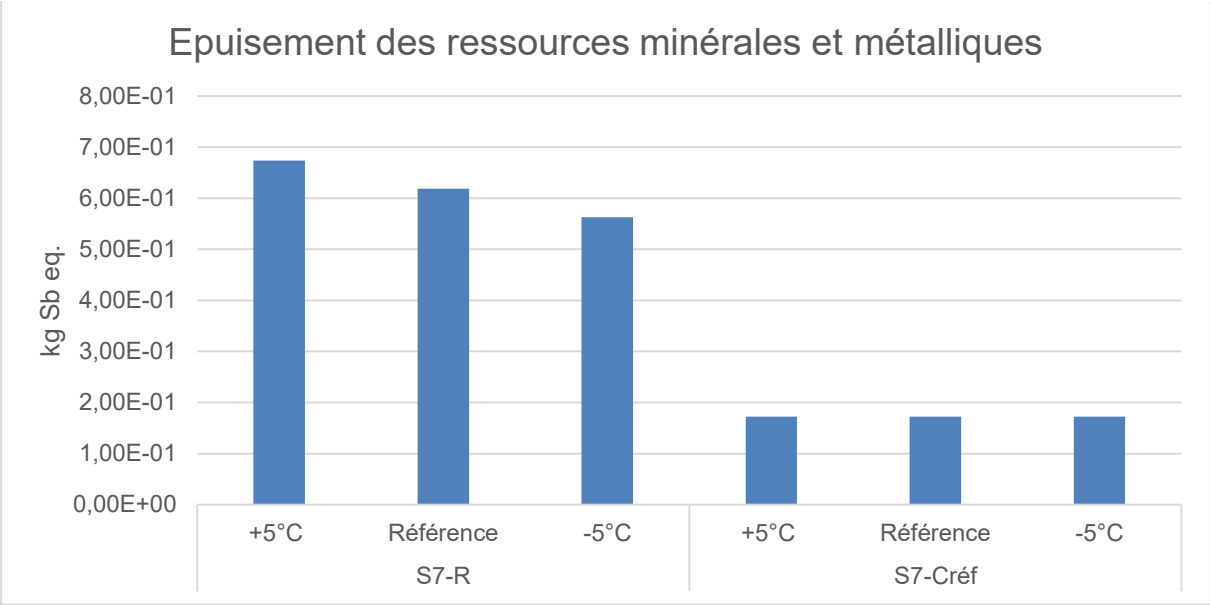


Figure 6-110 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Un changement de température de l'eau approvisionnée de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-Cref est plus performant sur l'indicateur de ressources énergétiques.

6.8.4 Analyse de sensibilité sur la température de la source de chaleur fatale

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de la source fatale qui est à 50°C dans le scénario de référence. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température :

- Scénario + 5°C : la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 55°C;
- Scénario – 5°: la consommation énergétique est calculée pour une source fatale de 45°C ;

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-35 : Consommation électrique, de gaz et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de la source fatale

		Référence	+5°C	-5°C
Consommation de gaz (kWh)	S7-R	0	0	0
	S7-Créf	12 417 501	12 417 501	12 417 501
Consommation d'électricité (kWh)	S7-R	2 672 136	2 375 232	2 969 040
	S7-Créf	0	0	0
Consommation d'énergie fatale (kWh)	S7-R	9 352 476	9 649 380	9 055 572
	S7-Créf	0	0	0

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température, notamment parce que les plusieurs éléments ne sont pas pris en compte (les différences de dimensionnement etc.).

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 7 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-36 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S7-R			S7-Créf
		+5°C chaleur fatale	Référence	-5°C chaleur fatale	Référence
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,41E+05	2,71E+05	3,01E+05	3,14E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,22E-01	1,38E-01	1,53E-01	5,32E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	1,22E+06	1,37E+06	1,52E+06	3,75E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	5,50E+02	6,18E+02	6,86E+02	2,34E+03
Particules fines	disease inc.	1,34E-02	1,50E-02	1,66E-02	9,01E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,76E-02	3,08E-02	3,41E-02	1,76E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	3,88E-03	4,32E-03	4,77E-03	3,73E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,74E+03	1,94E+03	2,15E+03	2,19E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	8,82E+01	9,90E+01	1,10E+02	2,18E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,84E+02	3,19E+02	3,54E+02	6,04E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	5,26E+03	5,86E+03	6,46E+03	6,66E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,16E+05	1,30E+05	1,44E+05	7,37E+04
Usage des sols	Pt	3,17E+06	3,57E+06	3,96E+06	4,33E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	2,70E+05	3,04E+05	3,38E+05	2,58E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,74E+07	3,08E+07	3,42E+07	4,81E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	5,55E-01	6,19E-01	6,82E-01	1,73E-01

6.8.4.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de la source fatale pour l'indicateur changement climatique :

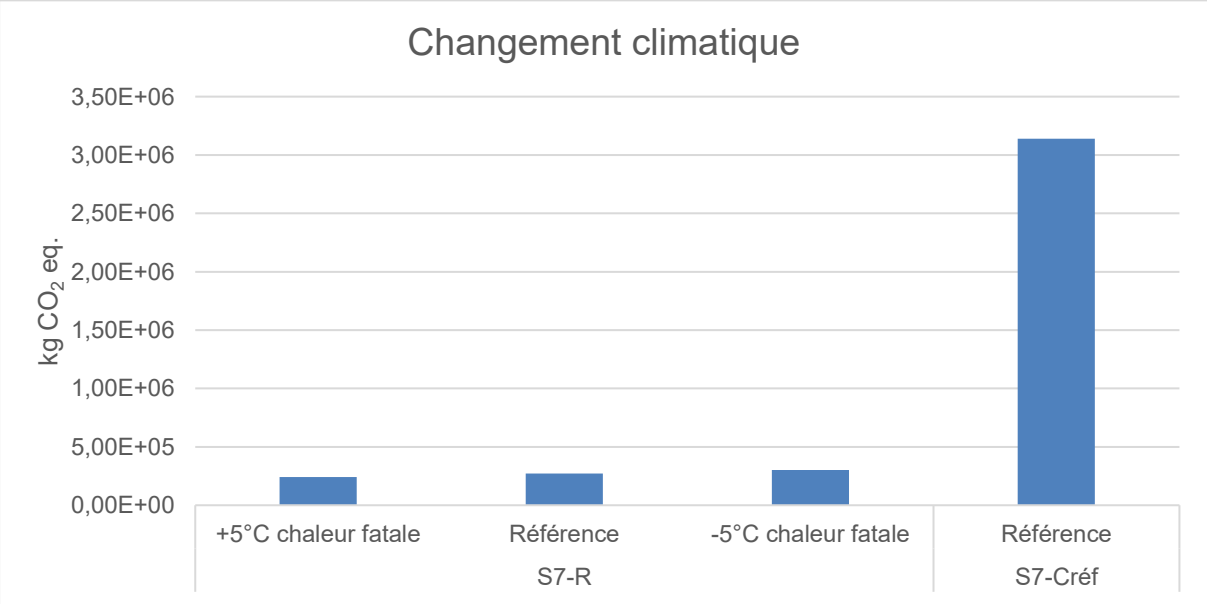


Figure 6-111 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur le changement climatique

Un changement de température de la source fatale de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-R est plus performant sur l'indicateur changement climatique.

6.8.4.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur température de la source fatale pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce :

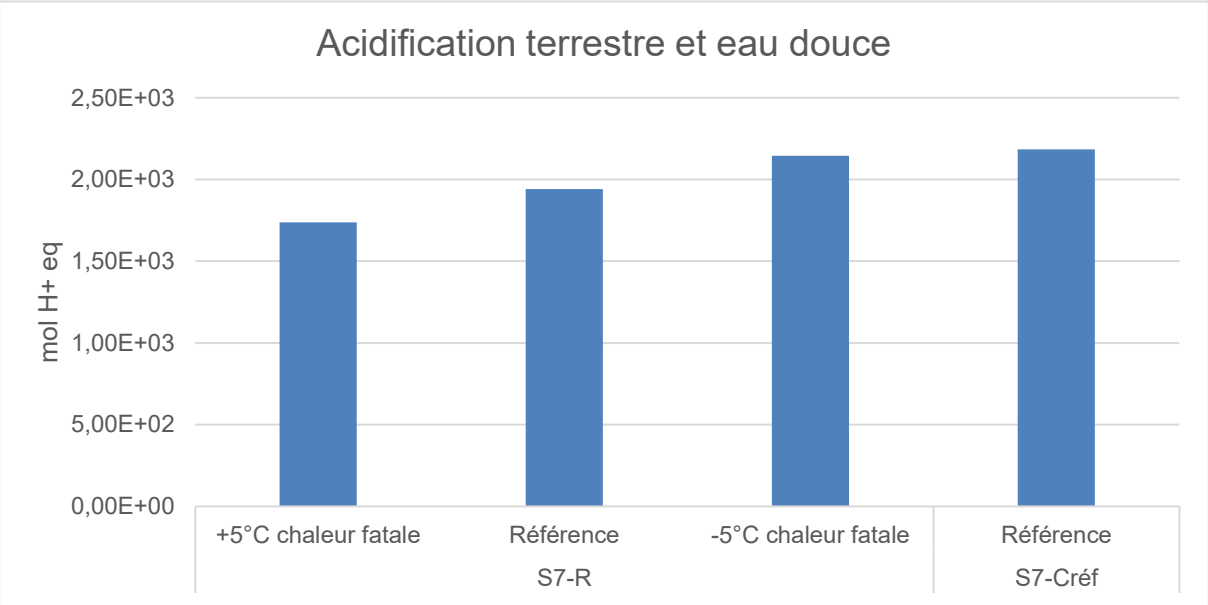


Figure 6-112 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'acidification terrestre et eau douce

Lorsque la source d'énergie est 5°C plus chaude, les impacts diminuent de 10%. Cependant, il n'est pas possible de trancher entre les 2 scénarios étant donné que la différence de résultats est inférieure à 30% qui est le seuil d'incertitude sur cet indicateur.

6.8.4.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de la source fatale pour l'indicateur de particules fines :

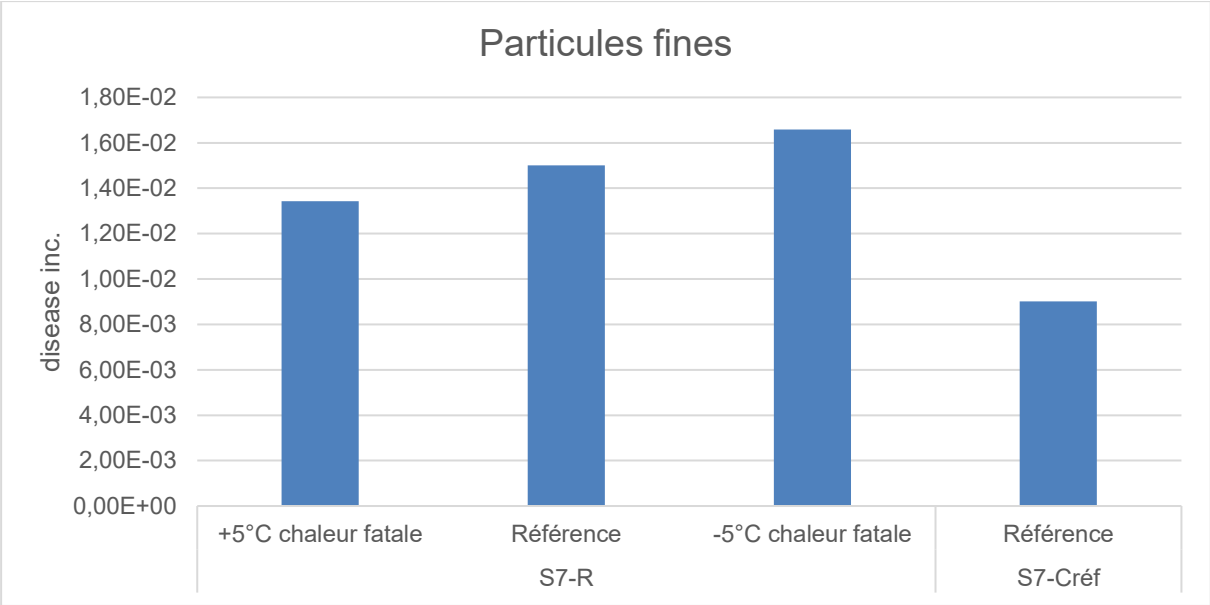


Figure 6-113 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur les particules fines

Un changement de température de la source fatale de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-Cref est plus performant sur l'indicateur de particules fines.

6.8.4.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de la source fatale pour l'indicateur de ressources énergétiques :

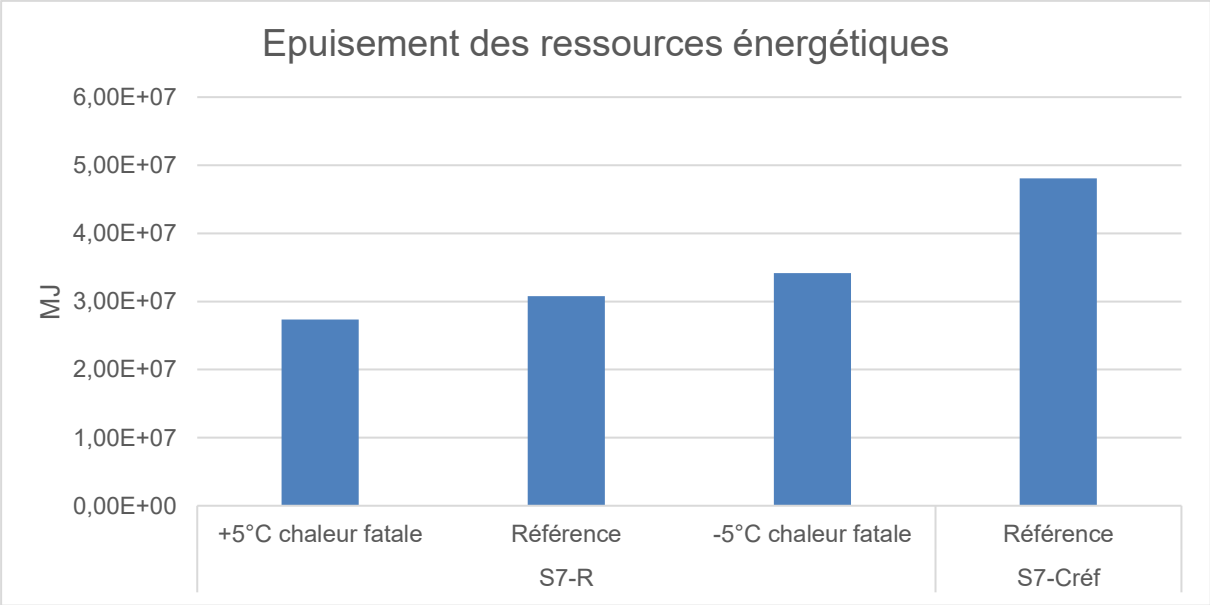


Figure 6-114 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'épuisement des ressources énergétiques

Un changement de température de la source fatale de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-R est plus performant sur l'indicateur de ressources énergétiques.

6.8.4.5 *Ressources minérales et métalliques*

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur la température de la source fatale pour l'indicateur de ressources minérales et métalliques :

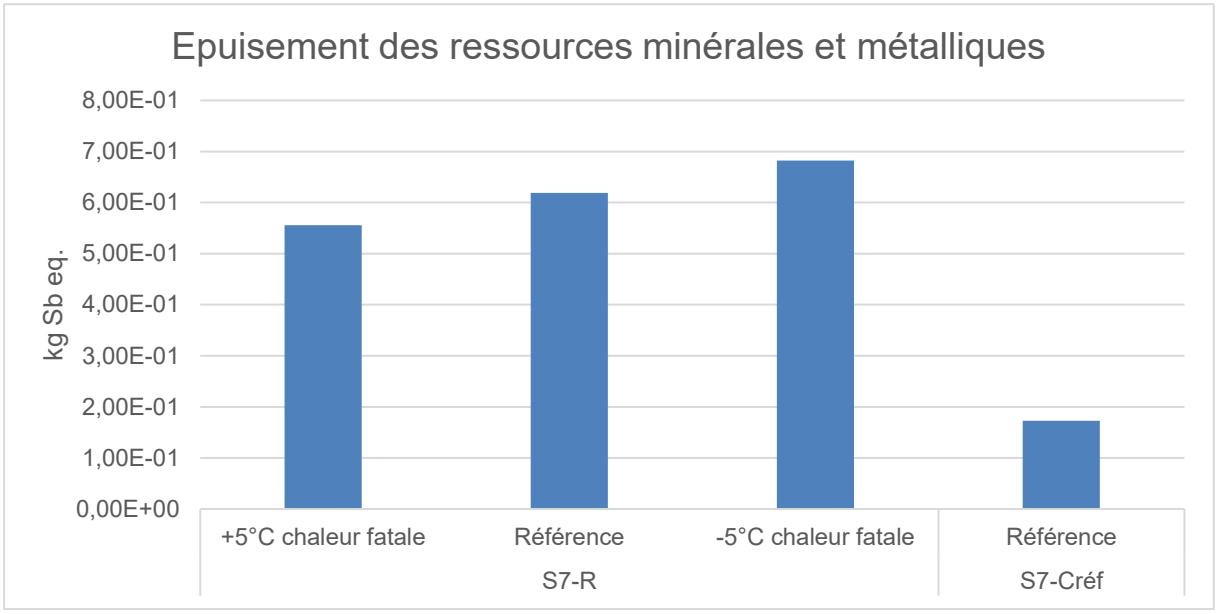


Figure 6-115 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques

Un changement de température de la source fatale de +/- 5°C ne modifie pas la conclusion générale : le scénario S7-Cref est plus performant sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques.

6.8.5 Conclusions sur les analyses de sensibilité sur le cas d'étude 7

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 7 est présentée dans le tableau suivant. Quatre analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 7, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Tableau 6-37 : Cas d'étude 7 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Paramètre B (uniquement dans S7-R)	Température de l'eau approvisionnée	Température de la source fatale (uniquement dans S7-R)
	Usage	ADEME	Industrie			
Changement climatique						
Acidification terrestre et d'eau douce						
Particules fines						
Epuisement des ressources énergétiques						
Epuisement des ressources minérales et métalliques						

Les analyses de sensibilité dans le scénario 7 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : une variation du mix électrique peut avoir une influence sur les conclusions pour certains indicateurs. Ainsi dans les indicateurs « acidification terrestre et eau douce » et « particules fines », le choix du mix peut modifier la hiérarchie entre les 2 scénarios. Pour les autres indicateurs, les conclusions restent valides quel que soit le mix considéré.
- **Valeur du facteur B** : la valeur du facteur B ne modifie pas les premières conclusions que ce soit lorsqu'un scénario est plus performant qu'un autre ou lorsqu'il n'est pas possible de trancher entre les 2 scénarios. Il est tout de même important de remarquer que le choix de cette valeur est structurant pour l'empreinte carbone des systèmes utilisant de l'énergie fatale ainsi que sur les autres catégories d'impacts. Il est aussi important pour l'impact acidification terrestre et d'eau douce pour lesquelles les impacts calculés pour le système S7-R sont supérieurs à ceux calculés pour le système S7-Cref, sans que les écarts soient suffisamment significatifs pour établir un classement net.
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas les premières conclusions.
- **Température de la source de chaleur fatale** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas les premières conclusions.

6.9 Cas d'étude 8

Pour le cas d'étude 8, les analyses de sensibilités suivantes ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Pour le scénario S8-R, la nature du réfrigérant est changée

6.9.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 8 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-38 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S8-R			S8-Cref		
		Référence	**Usage**	**ADEME**	**Référence**	**Usage**	**ADEME**
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,80E+05	3,50E+05	1,16E+05	1,17E+06	1,31E+06	1,10E+06

Indicateur	Unité	S8-R			S8-Cref		
		Référence	Usage	ADEME	Référence	Usage	ADEME
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	9,07E-02	8,60E-02	3,93E-02	2,59E-01	2,55E-01	2,06E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	9,02E+05	6,49E+05	3,21E+05	9,18E+05	7,08E+05	3,28E+05
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	4,13E+02	8,30E+02	2,83E+02	1,16E+03	1,49E+03	1,01E+03
Particules fines	disease inc.	9,79E-03	7,68E-03	1,70E-02	1,28E-02	1,09E-02	1,99E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,18E-02	3,19E-02	2,44E-02	2,72E-02	3,48E-02	2,91E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	3,23E-03	3,54E-03	4,56E-03	4,27E-03	4,47E-03	5,56E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,26E+03	1,80E+03	2,19E+03	1,97E+03	2,39E+03	2,89E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,61E+01	1,02E+02	4,17E+01	7,69E+01	1,03E+02	4,78E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,12E+02	3,24E+02	1,60E+02	4,05E+02	4,94E+02	3,49E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,73E+03	3,35E+03	8,82E+03	5,90E+03	5,51E+03	1,10E+04
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	9,13E+04	1,07E+05	9,85E+04	1,14E+05	1,25E+05	1,19E+05
Usage des sols	Pt	2,37E+06	9,86E+05	3,84E+06	2,52E+06	1,36E+06	3,99E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	2,01E+05	1,73E+05	1,04E+05	2,11E+05	1,86E+05	1,11E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,03E+07	1,75E+07	7,83E+06	3,55E+07	3,31E+07	2,28E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,31E-01	5,31E-01	1,24E+00	5,52E-01	5,66E-01	1,30E+00

6.9.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

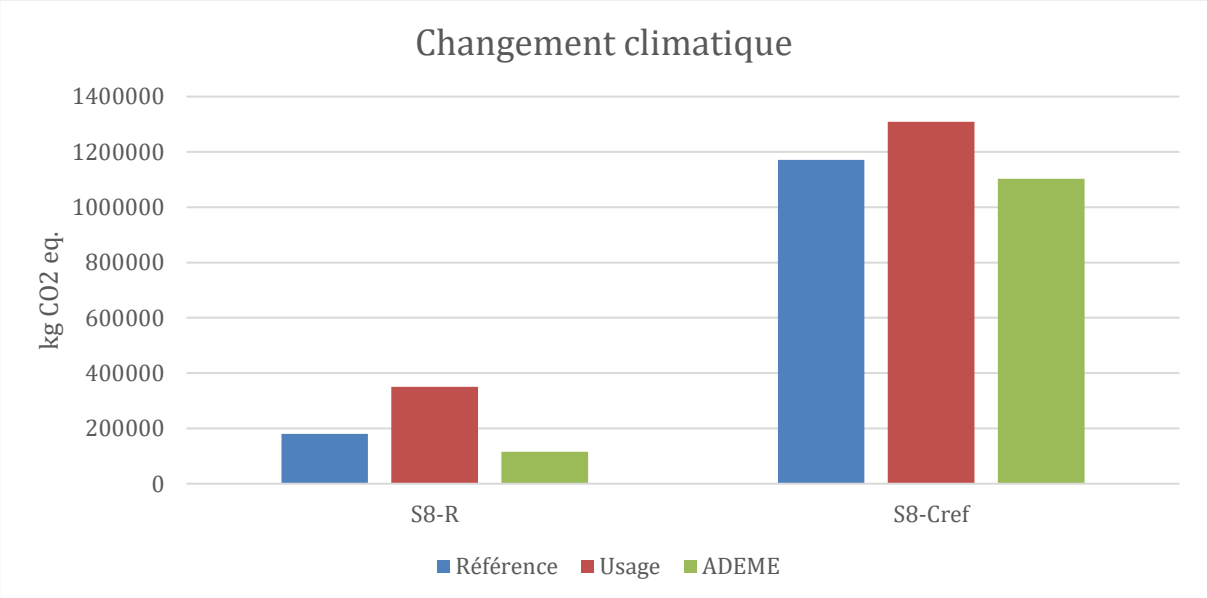


Figure 6-116 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Augmentation de l'impact équivalente sur les deux scénarios lors de la modélisation avec le mix Usage, les deux scénarios possédant une consommation électrique équivalente ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes à l'analyse de contribution.

6.9.1.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

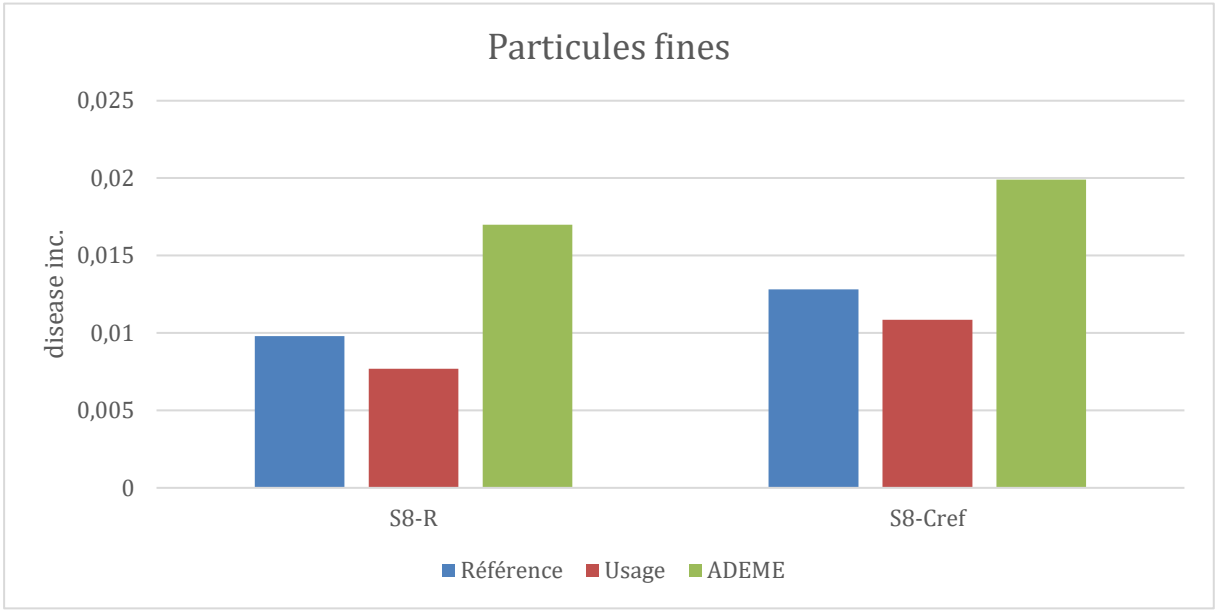


Figure 6-117 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution de l'impact équivalente sur les deux scénarios lors de la modélisation avec le mix Usage et le mix ADEME, les deux scénarios possédant une consommation électrique équivalente ;
- Augmentation de l'impact plus importante avec le mix ADEME ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes à l'analyse de contribution.

6.9.1.3 Acidification, terrestre et eau douce

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier le mix électrique.

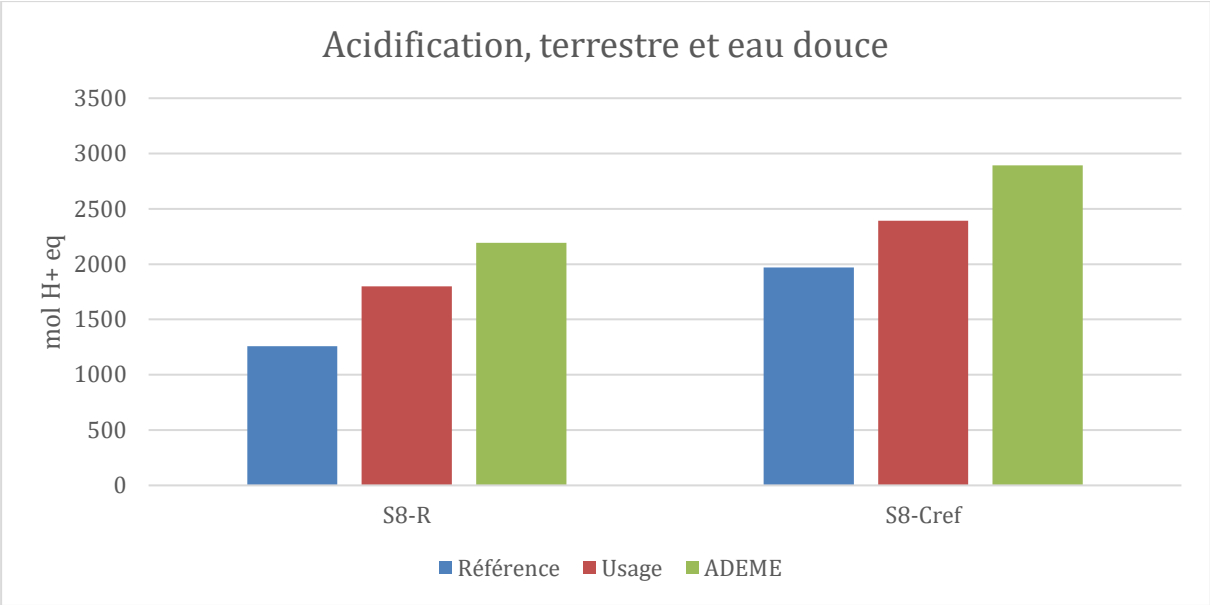


Figure 6-118 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution de l'impact équivalente sur les deux scénarios lors de la modélisation avec le mix Usage et le mix ADEME, les deux scénarios possédant une consommation électrique équivalente ;
- Augmentation de l'impact plus importante avec le mix ADEME ;
- L'impact du mix de référence se situe sous les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes à l'analyse de contribution.

6.9.1.4 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

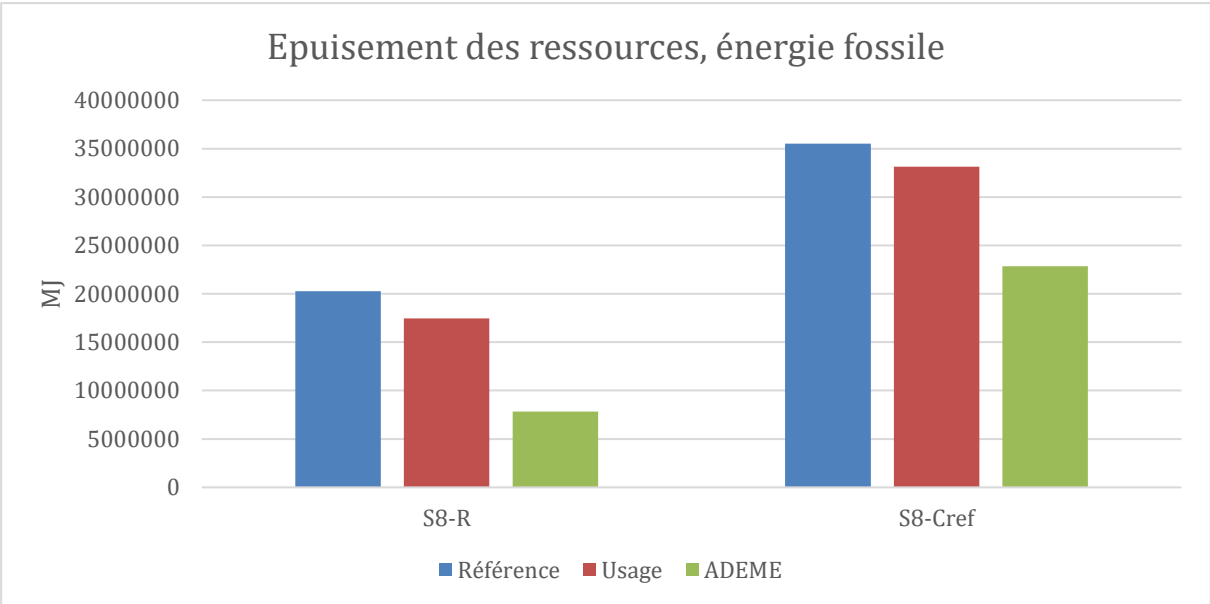


Figure 6-119 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution de l'impact équivalente sur les deux scénarios lors de la modélisation avec le mix Usage et le mix ADEME, les deux scénarios possédant une consommation électrique équivalente ;
- Diminution de l'impact plus importante avec le mix ADEME ;
- L'impact du mix de référence se situe au-dessus des impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes à l'analyse de contribution.

6.9.1.5 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

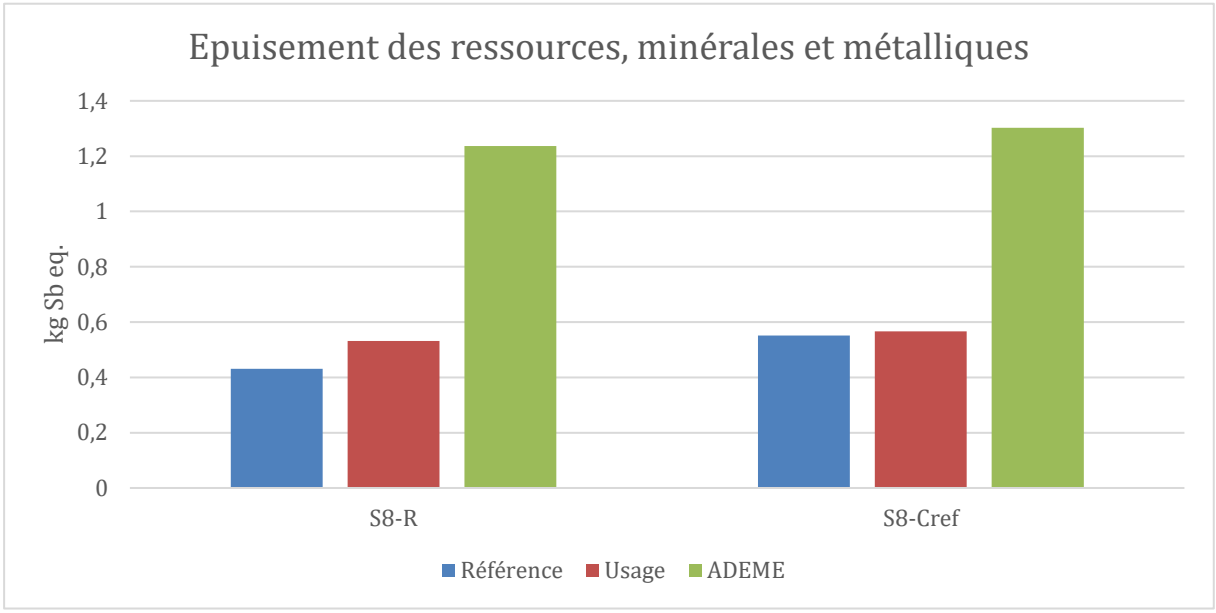


Figure 6-120 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution de l'impact équivalente sur les deux scénarios lors de la modélisation avec le mix Usage et le mix ADEME, les deux scénarios possédant une consommation électrique équivalente ;
- Augmentation de l'impact plus importante avec le mix ADEME ;
- L'impact du mix de référence se situe sous les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Les conclusions affirmées restent exactes à l'analyse de contribution.

6.9.2 Analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée

Une analyse de sensibilité est effectuée sur la température de l'eau dans le circuit secondaire de chaque bâtiment : dans la modélisation de référence, le secondaire est une boucle chaude 55/50°C et une boucle froide -11°C /-4°C.

L'analyse de sensibilité consiste à faire varier cette température de 10°C pour la boucle chaude est de 5°C pour la boucle froide :

- Scénario + 10°C :
  - boucle chaude 65°C / 60°C

    - boucle froide -11°C /-4°C
- Scénario - 10°C :
    - boucle chaude 45°C / 40°C
    - boucle froide -11°C /-4°C
- Scénario + 5°C :
    - boucle chaude 55°C / 50°C
    - boucle froide -6°C /1°C
- Scénario - 5°C :
    - boucle chaude 55°C / 50°C
    - boucle froide -16°C /-9°C

Les simulations thermiques ont donc été refaites en modifiant la température de consigne, ce qui influence les consommations énergétiques des systèmes :

Tableau 6-39 : Consommation électrique et de gaz des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée

		Référence	Chaud +10°C	Chaud -10°C	Froid +5°C	Froid -5°C
Consommation de gaz (kWh)	S8-R	0	0	0	0	0
	S8-Créf	3 905 807	3 980 102	3 811 485	3 905 807	3 905 807
Consommation d'électricité (kWh)	S8-R	1 579 152	1 994 446	1 555 737	1 407 038	1 757 725
	S8-Créf	1 305 850	1 305 850	1 305 850	1 111 804	1 507 445
COP	S8-R	6.08	4.81	6.17	6.82	5.46
	S8-Créf (froid)	4.4	4.4	4.4	5.17	3.81

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à faire varier uniquement ces consommations. Dans les faits, le changement de régime de température a une influence sur bien d'autres éléments. Cette analyse de sensibilité ne doit donc pas être considérée comme une ACV comparative de différents niveaux de température.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des quatre scénarios du cas d'étude 8 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-40 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S8-R					S8-Cref				
		Réf.	+10°C	-10°C	+ 5°C	- 5°C	Réf.	+10°C	-10°C	+ 5°C	- 5°C
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,80 E+05	2,21 E+05	1,77 E+05	1,62 E+05	1,98 E+05	1,17 E+06	1,19 E+06	1,15 E+06	1,15 E+06	1,19 E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	9,07 E-02	1,12 E-01	8,95 E-02	8,19 E-02	9,98 E-02	2,59 E-01	2,62 E-01	2,55 E-01	2,49 E-01	2,69 E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	9,02 E+05	1,11 E+06	8,90 E+05	8,14 E+05	9,93 E+05	9,18 E+05	9,18 E+05	9,18 E+05	8,19 E+05	1,02 E+06
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	4,13 E+02	5,08 E+02	4,08 E+02	3,74 E+02	4,54 E+02	1,16 E+03	1,17 E+03	1,14 E+03	1,11 E+03	1,20 E+03
Particules fines	disease inc.	9,79 E-03	1,20 E-02	9,67 E-03	8,88 E-03	1,07 E-02	1,28 E-02	1,29 E-02	1,27 E-02	1,17 E-02	1,39 E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,18 E-02	2,63 E-02	2,15 E-02	1,99 E-02	2,37 E-02	2,72 E-02	2,73 E-02	2,70 E-02	2,49 E-02	2,94 E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	3,23 E-03	3,85 E-03	3,19 E-03	2,97 E-03	3,49 E-03	4,27 E-03	4,29 E-03	4,24 E-03	3,97 E-03	4,58 E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,26 E+03	1,54 E+03	1,24 E+03	1,14 E+03	1,38 E+03	1,97 E+03	1,98 E+03	1,95 E+03	1,83 E+03	2,11 E+03

Indicateur	Unité	S8-R					S8-Cref				
		Réf.	+10°C	-10°C	+ 5°C	- 5°C	Réf.	+10°C	-10°C	+ 5°C	- 5°C
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	6,61 E+01	8,10 E+01	6,52 E+01	5,99 E+01	7,25 E+01	7,69 E+01	7,70 E+01	7,67 E+01	6,93 E+01	8,48 E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,12 E+02	2,60 E+02	2,09 E+02	1,91 E+02	2,32 E+02	4,05 E+02	4,08 E+02	4,00 E+02	3,82 E+02	4,29 E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,73 E+03	4,57 E+03	3,68 E+03	3,38 E+03	4,09 E+03	5,90 E+03	5,94 E+03	5,85 E+03	5,50 E+03	6,32 E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	9,13 E+04	1,11 E+05	9,02 E+04	8,33 E+04	9,96 E+04	1,14 E+05	1,15 E+05	1,14 E+05	1,05 E+05	1,24 E+05
Usage des sols	Pt	2,37 E+06	2,92 E+06	2,34 E+06	2,14 E+06	2,61 E+06	2,52 E+06	2,52 E+06	2,52 E+06	2,26 E+06	2,79 E+06
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	2,01 E+05	2,48 E+05	1,98 E+05	1,81 E+05	2,21 E+05	2,11 E+05	2,12 E+05	2,11 E+05	1,89 E+05	2,35 E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,03 E+07	2,50 E+07	2,00 E+07	1,83 E+07	2,23 E+07	3,55 E+07	3,58 E+07	3,52 E+07	3,33 E+07	3,78 E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,31 E-01	5,22 E-01	4,26 E-01	3,93 E-01	4,70 E-01	5,52 E-01	5,53 E-01	5,50 E-01	4,99 E-01	6,07 E-01

6.9.2.1 *Changement climatique*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la température de l'eau.

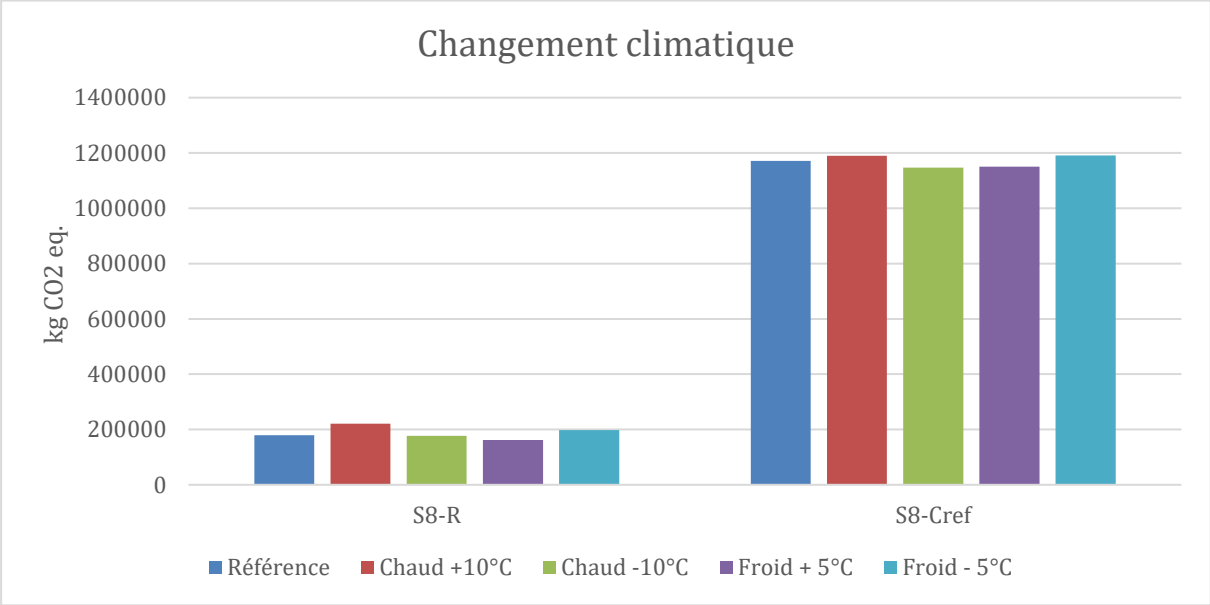


Figure 6-121 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.9.2.2 *Particules fines*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier la température de l'eau.

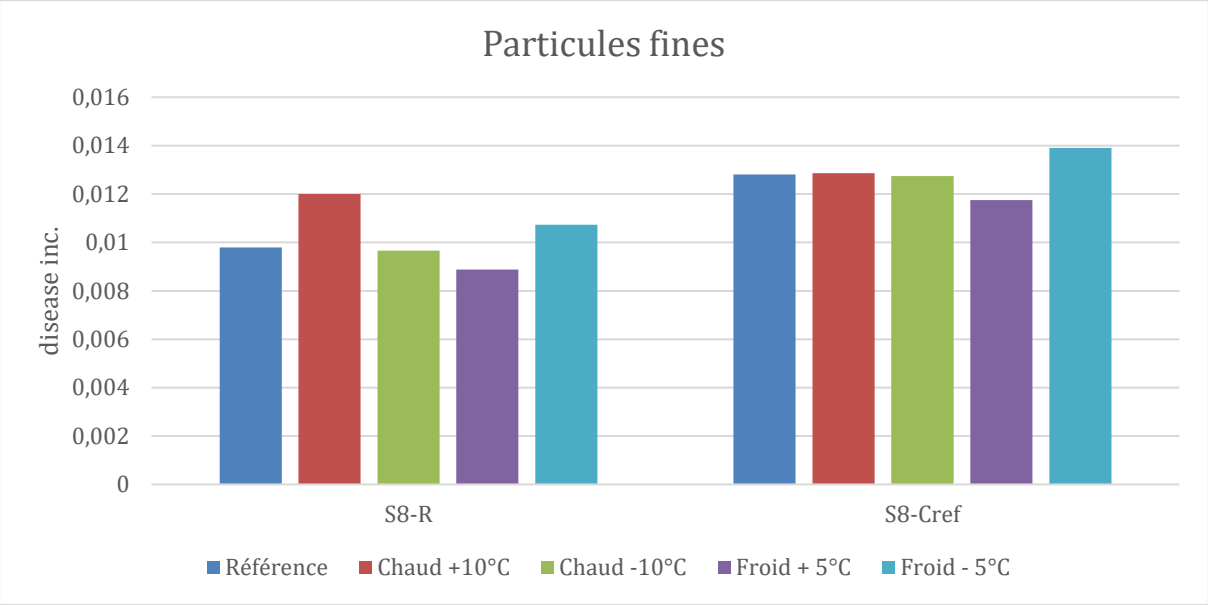


Figure 6-122 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur l'évolution de la boucle chaud -10°C et la boucle froide +5°C ;
- Evolutions plus importantes pour la boucle chaude +10°C sur le scénario S8-R et pour la boucle froide -5°C sur les deux scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.9.2.3 *Acidification, terrestre et eau douce*

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce en faisant varier la température de l'eau.

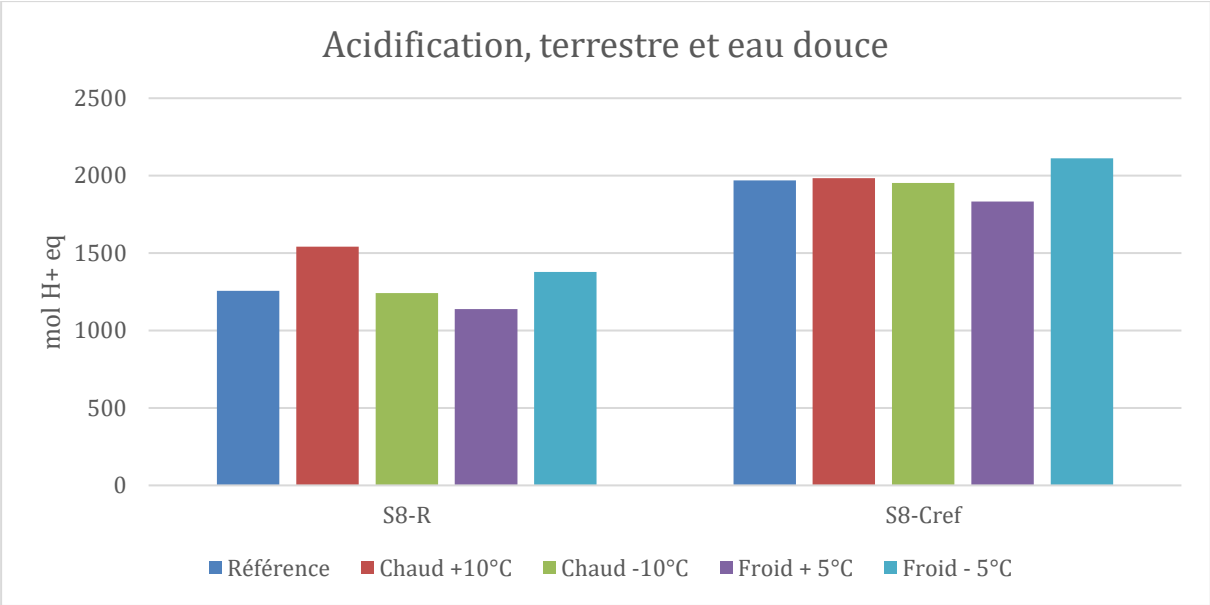


Figure 6-123 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur l'évolution de la boucle chaud -10°C et la boucle froide +5°C ;
- Evolutions plus importantes pour la boucle chaude +10°C sur le scénario S8-R et pour la boucle froide -5°C sur les deux scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.9.2.4 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier la température de l'eau.

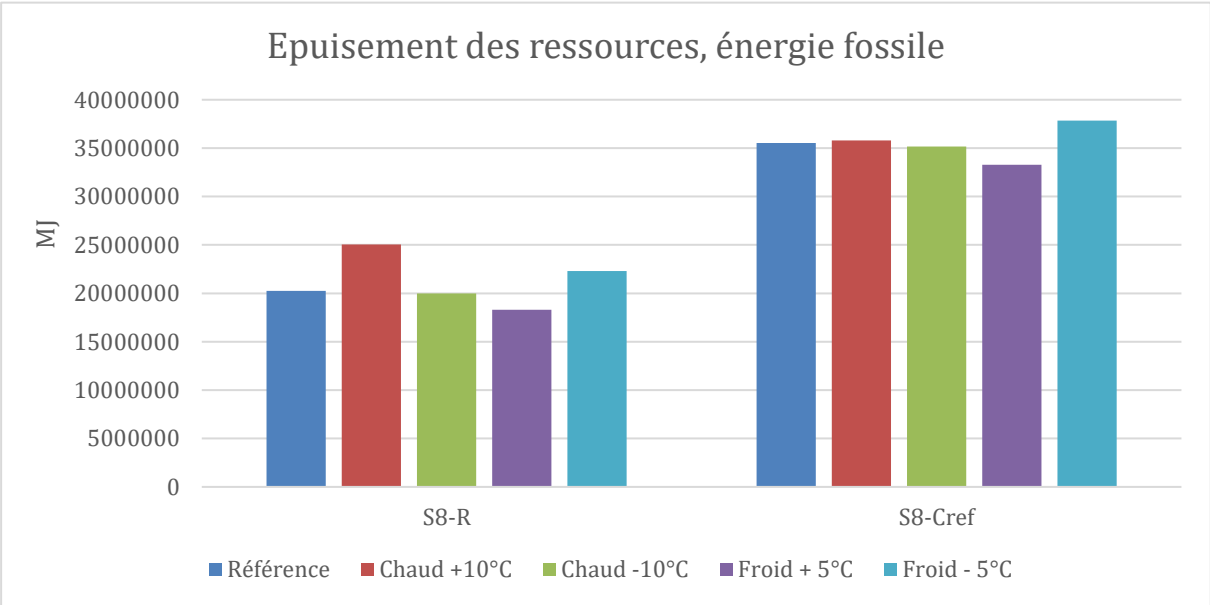


Figure 6-124 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur l'évolution de la boucle chaud -10°C et la boucle froide +5°C ;
- Evolutions plus importantes pour la boucle chaude +10°C sur le scénario S8-R et pour la boucle froide -5°C sur les deux scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.9.2.5 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 8 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier la température de l'eau.

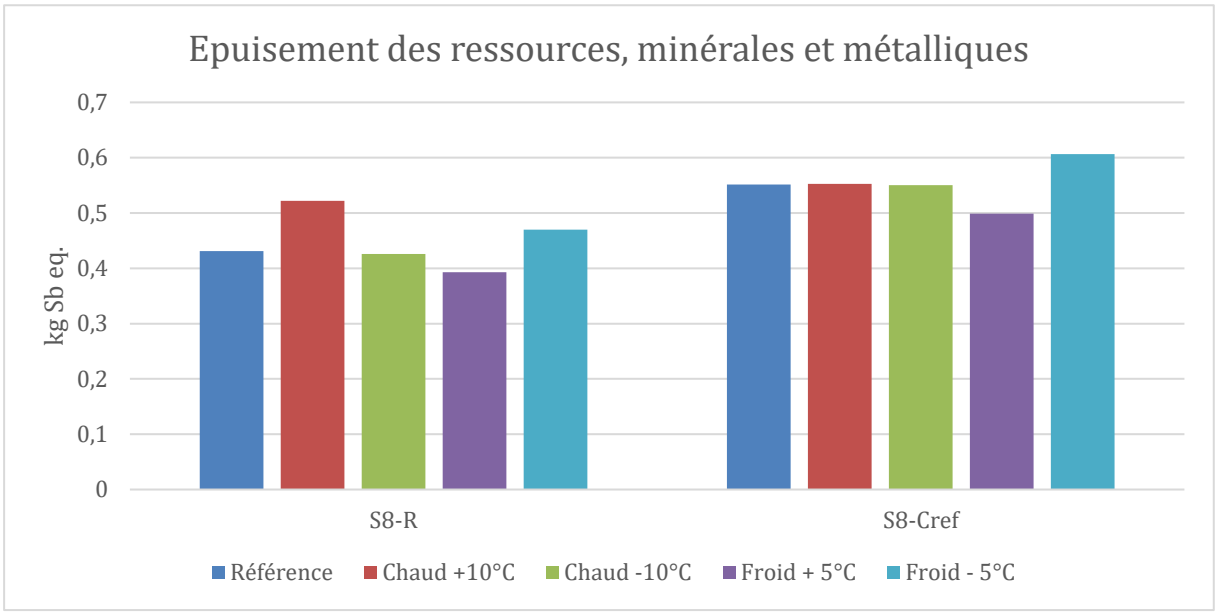


Figure 6-125 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolutions négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur l'évolution de la boucle chaud -10°C et la boucle froide +5°C ;
- Evolutions plus importantes pour la boucle chaude +10°C sur le scénario S8-R et pour la boucle froide -5°C sur les deux scénarios ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

Les conclusions affirmées restent exactes, les évolutions étant inférieures aux incertitudes en ACV.

6.9.3 Conclusions sur les analyses de sensibilité sur le cas d'étude 8

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 8 est présentée dans le tableau suivant. Deux analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 8, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-41 : Cas d'étude 8 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Température de l'eau approvisionnée
	Chauffage	ADEME	Industrie	
Changement climatique				
Acidification terrestre et d'eau douce				
Particules fines				
Epuisement des ressources énergétiques				
Epuisement des ressources minérales et métalliques				

Les analyses de sensibilité dans le scénario 8 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée. Les scénarios S8-R et S8-Cref ont une consommation électrique équivalente et le fait de modifier le mix ne permet pas un basculement entre les scénarios ;
- **Température d'approvisionnement de l'eau** : une augmentation ou un abaissement de la température de l'eau d'approvisionnement du réseau ne modifie pas les premières conclusions.

6.10 Cas d'étude 9

Pour le cas d'étude 9, 3 analyses de sensibilités ont été menées :

- Le mix considéré pour les équipements de chaud : le mix par usage « chauffage », le mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix « Industrie » ont été utilisés ;
- Le taux de couverture solaire : des taux de 43%, 63% et de 100% seront comparés avec la référence qui se situe à 53 % ;
- Le taux de recyclage des panneaux solaires.

6.10.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 9 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-42 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S9-R				S9-Créf			
		Référence	Usage	ADEME	Industrie	Référence	Usage	ADEME	Industrie
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	2,55E+06	2,55E+06	2,55E+06	2,55E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	2,16E-01	2,16E-01	2,13E-01	2,16E-01	4,33E-01	4,33E-01	4,32E-01	4,33E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	5,94E+04	5,94E+04	3,30E+04	6,60E+04	1,56E+04	1,56E+04	8,99E+03	1,72E+04

Indicateur	Unité	S9-R				S9-Créf			
		Référence	Usage	ADEME	Industrie	Référence	Usage	ADEME	Industrie
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,24E+03	1,24E+03	1,24E+03	1,24E+03	2,00E+03	2,00E+03	2,00E+03	2,00E+03
Particules fines	disease inc.	8,81E-03	8,81E-03	9,13E-03	8,70E-03	6,74E-03	6,74E-03	6,82E-03	6,71E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,24E-02	7,24E-02	7,26E-02	7,31E-02	1,79E-02	1,79E-02	1,79E-02	1,80E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,05E-02	2,05E-02	2,05E-02	2,06E-02	4,39E-03	4,39E-03	4,40E-03	4,43E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,39E+03	1,39E+03	1,43E+03	1,37E+03	1,84E+03	1,84E+03	1,86E+03	1,84E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,58E+01	5,58E+01	5,47E+01	5,60E+01	1,89E+01	1,89E+01	1,86E+01	1,89E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,51E+02	3,51E+02	3,48E+02	3,49E+02	5,28E+02	5,28E+02	5,28E+02	5,28E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,95E+03	3,95E+03	4,18E+03	3,85E+03	5,79E+03	5,79E+03	5,84E+03	5,76E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,93E+05	2,93E+05	2,93E+05	2,95E+05	7,73E+04	7,73E+04	7,73E+04	7,80E+04
Usage des sols	Pt	2,09E+06	2,09E+06	2,16E+06	2,27E+06	3,55E+05	3,55E+05	3,72E+05	4,00E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,39E+04	4,39E+04	3,95E+04	4,46E+04	1,86E+04	1,86E+04	1,75E+04	1,88E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,05E+07	2,05E+07	1,99E+07	2,06E+07	3,89E+07	3,89E+07	3,87E+07	3,89E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,77E-01	4,77E-01	5,14E-01	5,05E-01	1,88E-01	1,88E-01	1,98E-01	1,95E-01

6.10.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur changement climatique :

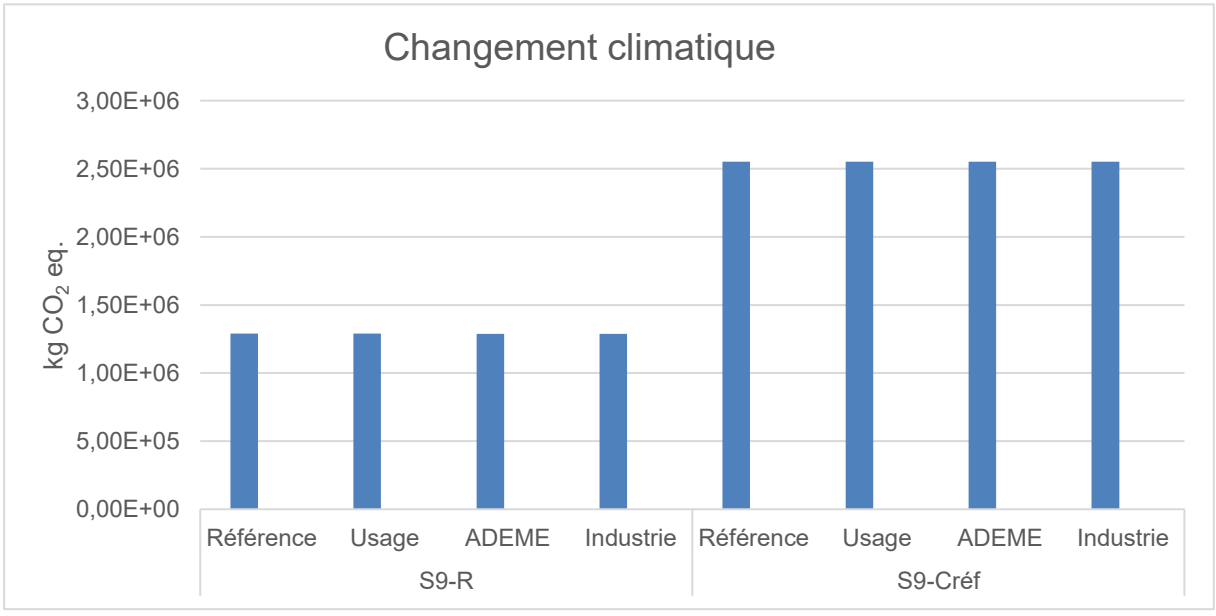


Figure 6-126 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur du changement climatique

Quel que soit le mix considéré, le scénario S9-R sera plus performant que le scénario S9-Créf : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à l'utilisation de gaz naturel. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.1.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur des ressources énergétiques :

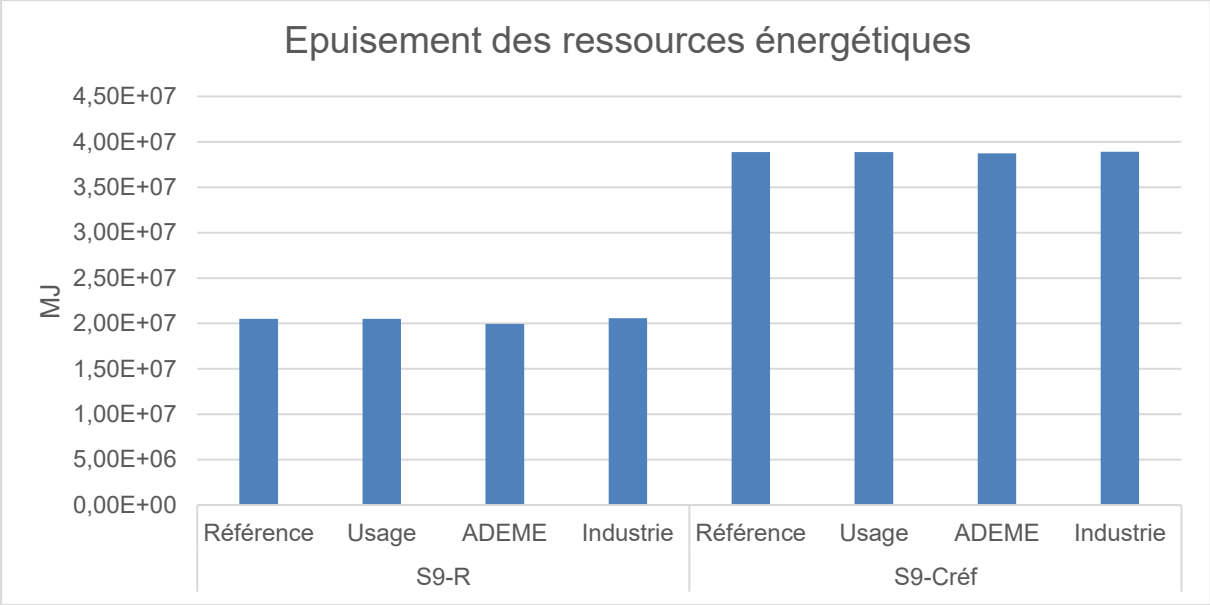


Figure 6-127 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources énergétiques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S9-R sera plus performant que le scénario S9-Créf : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à l'utilisation de gaz naturel. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.1.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur des ressources minérales et métalliques :

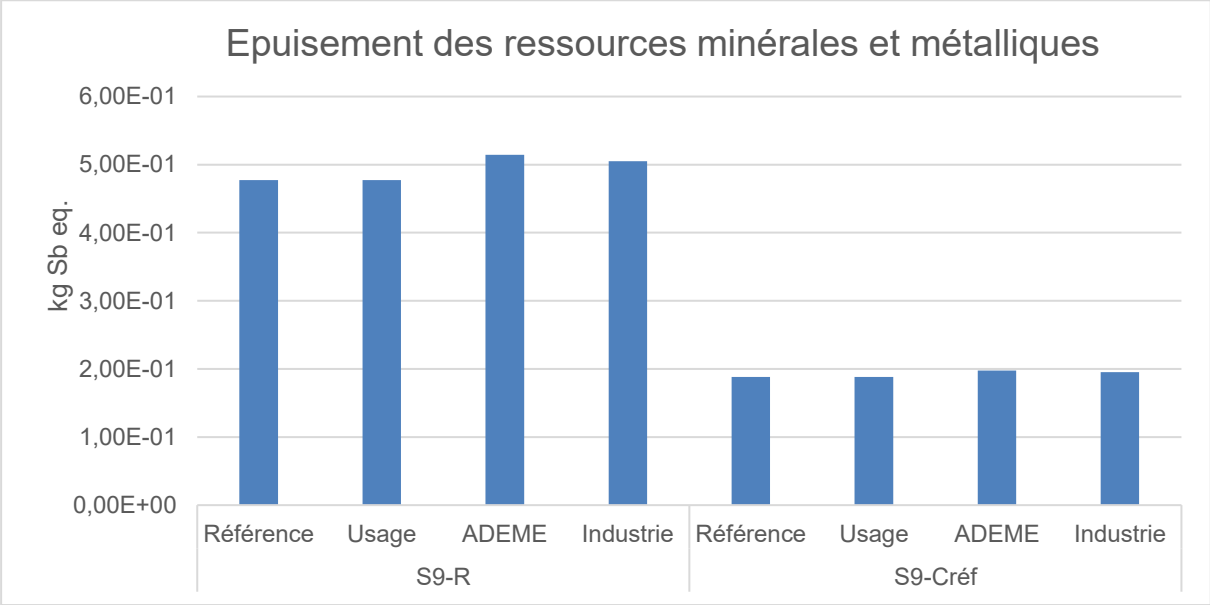


Figure 6-128 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S9-Créf sera plus performant que le scénario S9-R : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à la production des infrastructures. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.2 Analyse de sensibilité sur le taux de couverture solaire

Les hypothèses du scénario S9-R ont été modifiées pour prendre en compte des variations de couverture solaire et challenger les résultats de ce scénario. Les sensibilités ont donc été menées autour de la couverture solaire de de référence de 53% :

- Couverture solaire à 43% : le scénario est composé alors de 448 capteurs pour une surface solaire de 7150 m² et un volume de stockage de 1000 m^3
- Couverture solaire à 63% : le scénario est composé alors de 720 capteurs pour une surface solaire de 11490 m² et un volume de stockage de 7500 m^3
- Couverture solaire théorique avec objectif à 100% : le scénario est composé alors de 2944 capteurs pour une surface solaire de 46970 m² et un volume de stockage de 40 000 m^3

Ces consommations d'énergie et dimensionnement de stockage ont été modélisés via TRNSYS par des fournisseurs membres du comité technique.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 9 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-43 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité de la couverture solaire sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S9-RC				S9- Créf
		Référence	Couverture solaire à 63%	Couverture solaire à 43%	Objectif 100% couverture solaire	
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,29E+06	1,14E+06	1,52E+06	9,56E+05	2,55E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	2,16E-01	1,83E-01	2,57E-01	9,58E-02	4,33E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	5,94E+04	7,81E+04	5,10E+04	2,22E+05	1,56E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,24E+03	1,40E+03	1,29E+03	3,30E+03	2,00E+03
Particules fines	disease inc.	8,68E-03	1,45E-02	6,55E-03	6,00E-02	6,74E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,27E-02	1,53E-01	3,67E-02	7,54E-01	1,79E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,04E-02	4,38E-02	1,00E-02	2,18E-01	4,39E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,38E+03	1,77E+03	1,32E+03	5,33E+03	1,84E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,52E+01	1,07E+02	3,32E+01	4,99E+02	1,89E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,48E+02	4,10E+02	3,55E+02	1,06E+03	5,28E+02

Indicateur	Unité	S9-RC				S9- Créf
		Référence	Couverture solaire à 63%	Couverture solaire à 43%	Objectif 100% couverture solaire	
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,93E+03	4,69E+03	3,95E+03	1,24E+04	5,79E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,92E+05	6,10E+05	1,51E+05	2,99E+06	7,73E+04
Usage des sols	Pt	2,11E+06	3,40E+06	1,41E+06	1,52E+07	3,55E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,38E+04	7,34E+04	3,09E+04	3,06E+05	1,86E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,05E+07	1,84E+07	2,38E+07	1,72E+07	3,89E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,69E-01	8,43E-01	3,11E-01	3,74E+00	1,88E-01

6.10.2.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur changement climatique :

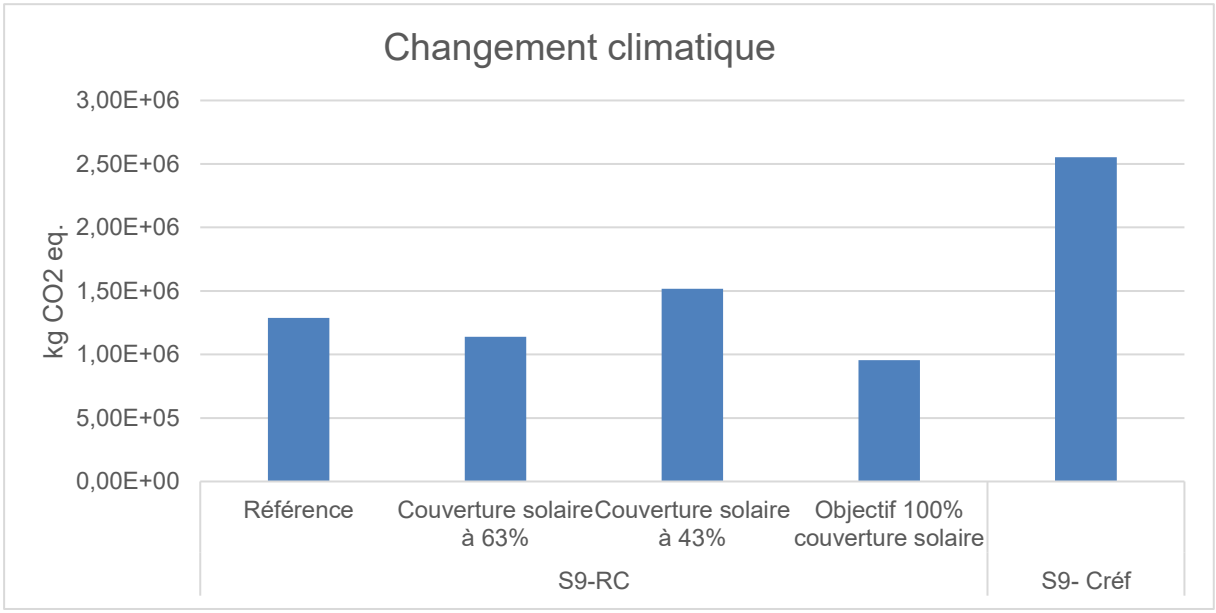


Figure 6-129 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur changement climatique

Plus le taux de couverture solaire est élevé, plus la quantité de gaz naturel nécessaire pour fournir l'appoint est faible ce qui entraine une diminution des impacts dans cet indicateur.

Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S9-R est plus performant que le scénario S9-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.2.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur ressources énergétiques :

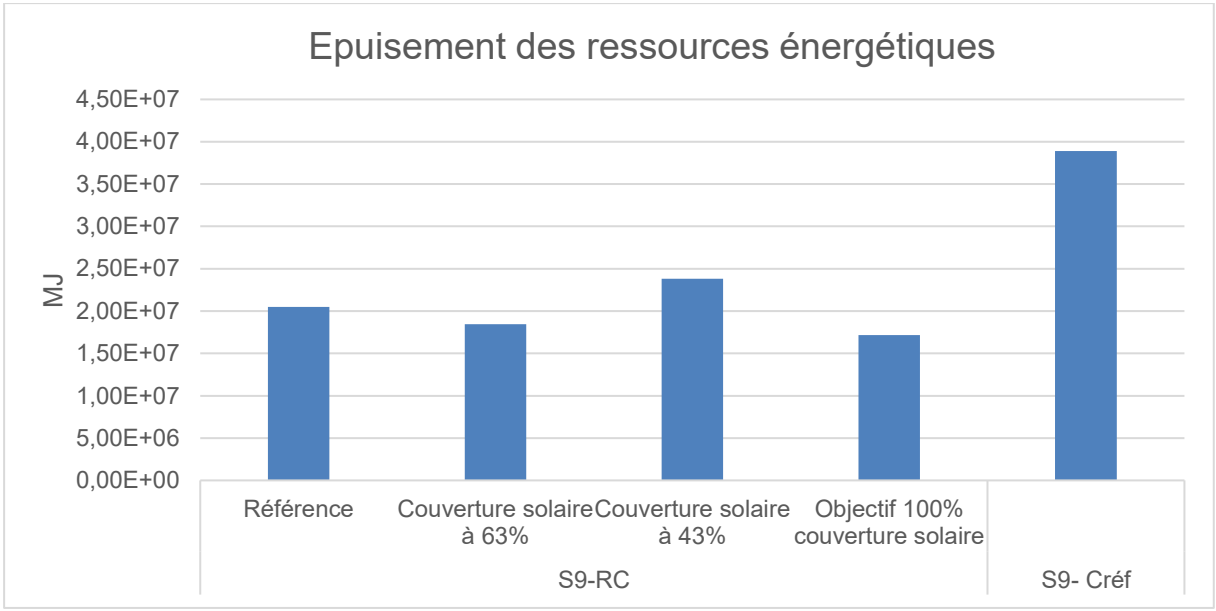


Figure 6-130 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur de ressources énergétiques

L'indicateur ressources énergétiques évolue de la même façon que le changement climatique. Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S9-R est plus performant que le scénario S9-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.2.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur ressources minérales et métalliques :

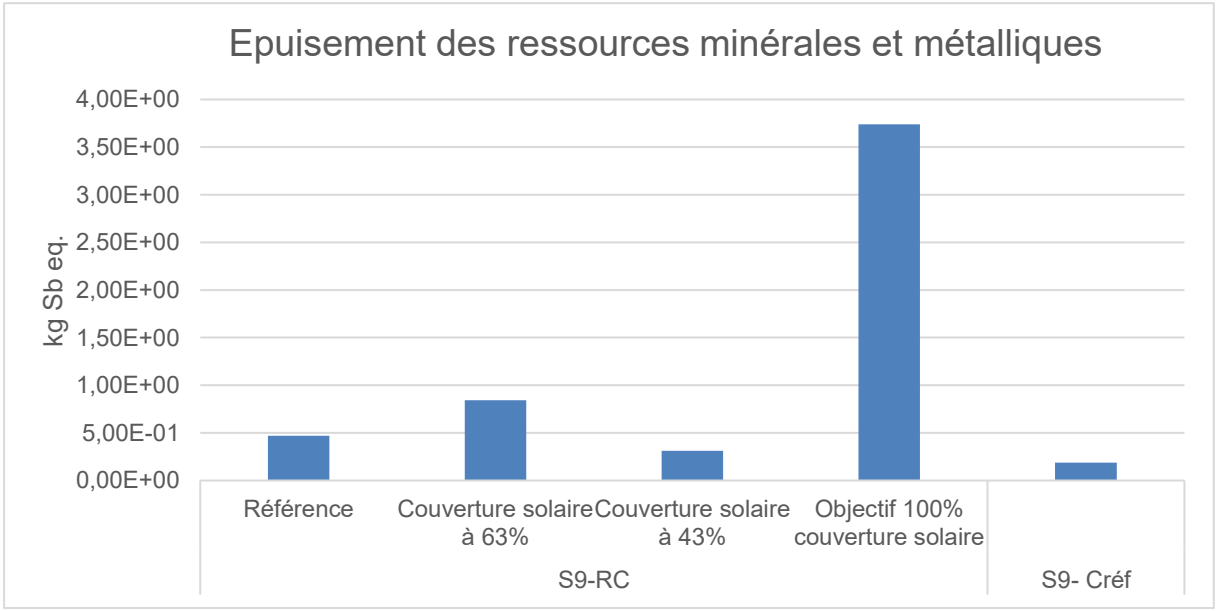


Figure 6-131 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques

Plus le taux de couverture solaire est important, plus la quantité de métaux nécessaire à la production des panneaux solaires et des ballons tampon est grande ce qui entraine une augmentation des impacts dans cet indicateur.

Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S9-R est moins performant que le scénario S9-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.3 Analyse de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 9 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Les panneaux solaires sont modélisés dans le scénario de référence comme étant recyclés en fin de vie à 90% pour les métaux et à 0% pour les autres composants.

Une analyse de sensibilité est menée sur cette hypothèse, en prenant en compte trois autres variantes :

Tableau 6-44 : Cas d'étude 9 : Taux de recyclage des métaux en fin de vie

Taux de recyclage en fin de vie (%)	Référence	Optimiste	Moyen	Pessimiste
Matières métalliques	90%	100%	50%	0%
Autres matières	0%	100%	50%	0%

Tableau 6-45 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S9-RC				S9-Créf
		Optimiste	Moyen	Référence	Pessimiste	
Changement climatique	kg CO_2 eq	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,30E+06	2,55E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	2,16E-01	2,16E-01	2,16E-01	2,16E-01	4,33E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	5,94E+04	5,94E+04	5,94E+04	6,09E+04	1,56E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	1,24E+03	1,24E+03	1,24E+03	1,28E+03	2,00E+03
Particules fines	disease inc.	8,68E-03	8,77E-03	8,81E-03	9,54E-03	6,74E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	7,27E-02	7,25E-02	7,24E-02	7,11E-02	1,79E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	2,04E-02	2,05E-02	2,05E-02	2,10E-02	4,39E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,38E+03	1,39E+03	1,39E+03	1,45E+03	1,84E+03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,52E+01	5,58E+01	5,58E+01	6,21E+01	1,89E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,48E+02	3,50E+02	3,51E+02	3,62E+02	5,28E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,93E+03	3,94E+03	3,95E+03	4,04E+03	5,79E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,92E+05	2,93E+05	2,93E+05	3,00E+05	7,73E+04
Usage des sols	Pt	2,11E+06	2,11E+06	2,09E+06	2,12E+06	3,55E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,38E+04	4,38E+04	4,39E+04	4,46E+04	1,86E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	2,05E+07	2,05E+07	2,05E+07	2,06E+07	3,89E+07

Indicateur	Unité	S9-RC				S9-Créf
		Optimiste	Moyen	Référence	Pessimiste	
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,69E-01	4,77E-01	4,77E-01	5,52E-01	1,88E-01

6.10.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur changement climatique :

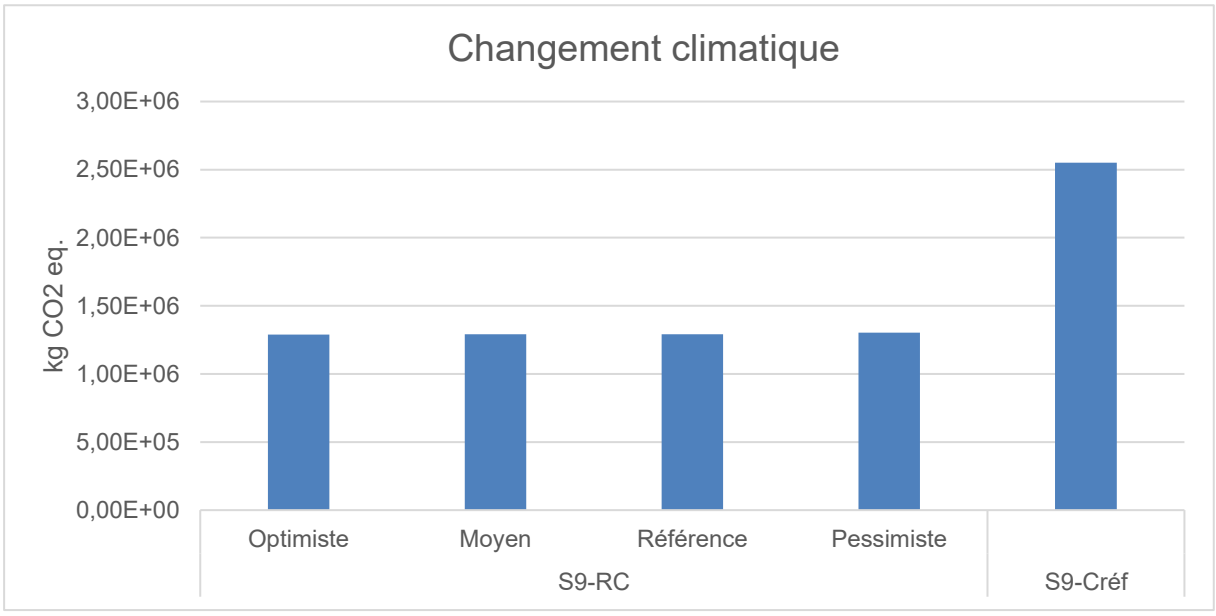


Figure 6-132 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur changement climatique

Le taux de recyclage des panneaux a une faible influence sur les résultats finaux.

Quel que soit le taux de recyclage des panneaux solaires considéré, le scénario S9-R est plus performant que le scénario S9-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.3.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur ressources énergétiques :

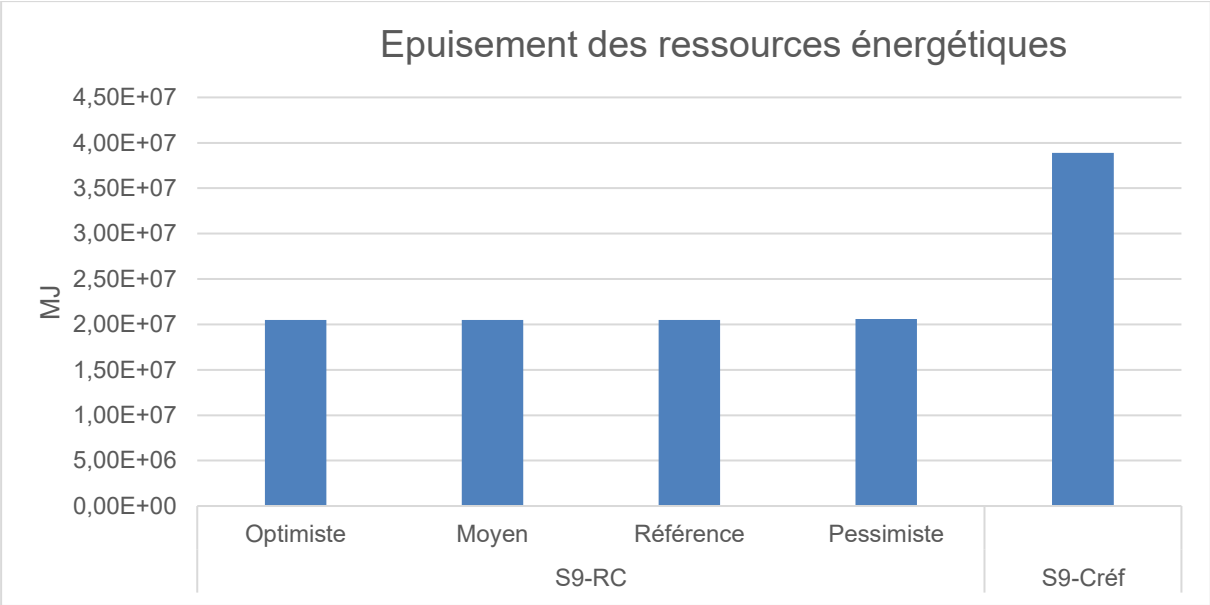


Figure 6-133 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur ressources énergétiques

Le taux de recyclage des panneaux a une faible influence sur les résultats finaux.

Quel que soit le taux de recyclage des panneaux solaires considéré, le scénario S9-R est plus performant que le scénario S9-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.3.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur ressources minérales et métalliques :

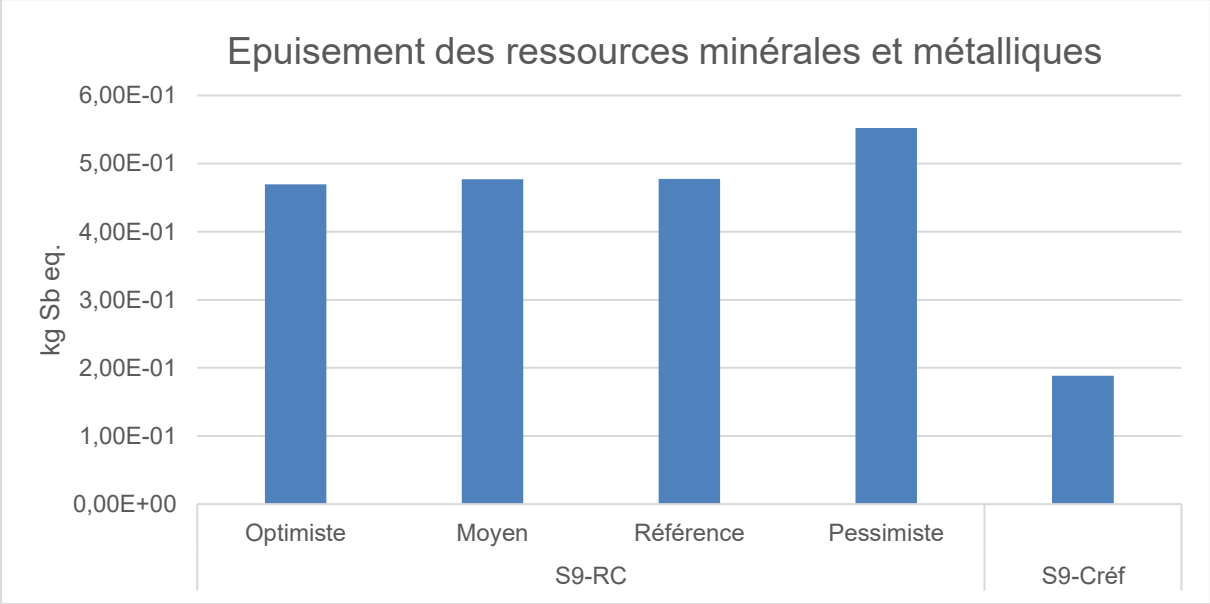


Figure 6-134 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

Plus le recyclage est faible, plus la déplétion en minéraux et en métaux sera importante. Cependant, quel que soit le taux de recyclage considéré, le scénario S9-Créf sera plus performant que le scénario S9-R. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.10.4 Conclusions sur les analyses de sensibilité sur le cas d'étude 9

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 9 est présentée dans le tableau suivant. Trois analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 9, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-46 : Cas d'étude 9 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Couverture solaire (uniquement dans S9-R)	Taux de recyclage des panneaux (uniquement dans S9-R)
	Chauffage	ADEME	Industrie		
Changement climatique					
Epuisement des ressources énergétiques					
Epuisement des ressources minérales et métalliques					

Les analyses de sensibilité dans le scénario 9 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée.
- **Taux de couverture solaire** : un changement de taux de couvertures solaire du scénario solaire ne modifie pas la hiérarchie entre les différents scénarios. Cependant, l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques est très lié à ce paramètre.
- **Taux de recyclage des panneaux solaires** : un changement de taux de recyclage des panneaux solaires ne modifie pas la hiérarchie entre les différents scénarios. Cependant, l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques est très lié à ce paramètre.

6.11 Cas d'étude 10

Pour le cas d'étude 10, 3 analyses de sensibilités ont été menées :

- Le mix considéré pour les équipements de chaud : le mix par usage « chauffage », le mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » et le mix « Industrie » ont été utilisés ;
- Le taux de couverture solaire : des taux de 25 %, 45 % seront comparés avec la référence qui se situe à 35 % ;
- Le taux de recyclage des panneaux solaires.

6.11.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 10 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle

indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-47 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S10-R				S10-Créf			
		Réf.	Usage	ADEME	Indus.	Réf.	Usage	ADEME	Indus.
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,42E+05	9,42E+05	9,38E+05	9,37E+05	1,34E+06	1,34E+06	1,34E+06	1,34E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,58E-01	1,58E-01	1,54E-01	1,58E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,26E-01	2,28E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	7,85E+04	7,85E+04	3,89E+04	8,85E+04	3,20E+04	3,20E+04	1,34E+04	3,66E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	9,79E+02	9,79E+02	9,70E+02	9,74E+02	1,01E+03	1,01E+03	1,01E+03	1,01E+03
Particules fines	disease inc.	7,91E-03	7,91E-03	8,39E-03	7,74E-03	4,33E-03	4,33E-03	4,56E-03	4,26E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	6,91E-02	6,91E-02	6,93E-02	7,01E-02	1,16E-02	1,16E-02	1,17E-02	1,21E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,89E-02	1,89E-02	1,90E-02	1,92E-02	3,00E-03	3,00E-03	3,05E-03	3,12E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,16E+03	1,16E+03	1,22E+03	1,13E+03	9,72E+02	9,72E+02	1,00E+03	9,56E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,75E+01	5,75E+01	5,58E+01	5,77E+01	1,25E+01	1,25E+01	1,18E+01	1,26E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	3,01E+02	3,01E+02	2,98E+02	2,99E+02	2,65E+02	2,65E+02	2,64E+02	2,64E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,26E+03	3,26E+03	3,60E+03	3,11E+03	2,95E+03	2,95E+03	3,11E+03	2,88E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,74E+05	2,74E+05	2,74E+05	2,78E+05	5,11E+04	5,11E+04	5,13E+04	5,31E+04
Usage des sols	Pt	1,89E+06	1,89E+06	1,98E+06	2,15E+06	2,66E+05	2,66E+05	3,13E+05	3,92E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,29E+04	4,29E+04	3,63E+04	4,40E+04	1,54E+04	1,54E+04	1,23E+04	1,59E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,56E+07	1,56E+07	1,48E+07	1,58E+07	2,08E+07	2,08E+07	2,04E+07	2,09E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,53E-01	6,53E-01	7,08E-01	6,94E-01	1,34E-01	1,34E-01	1,60E-01	1,54E-01

6.11.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur changement climatique :

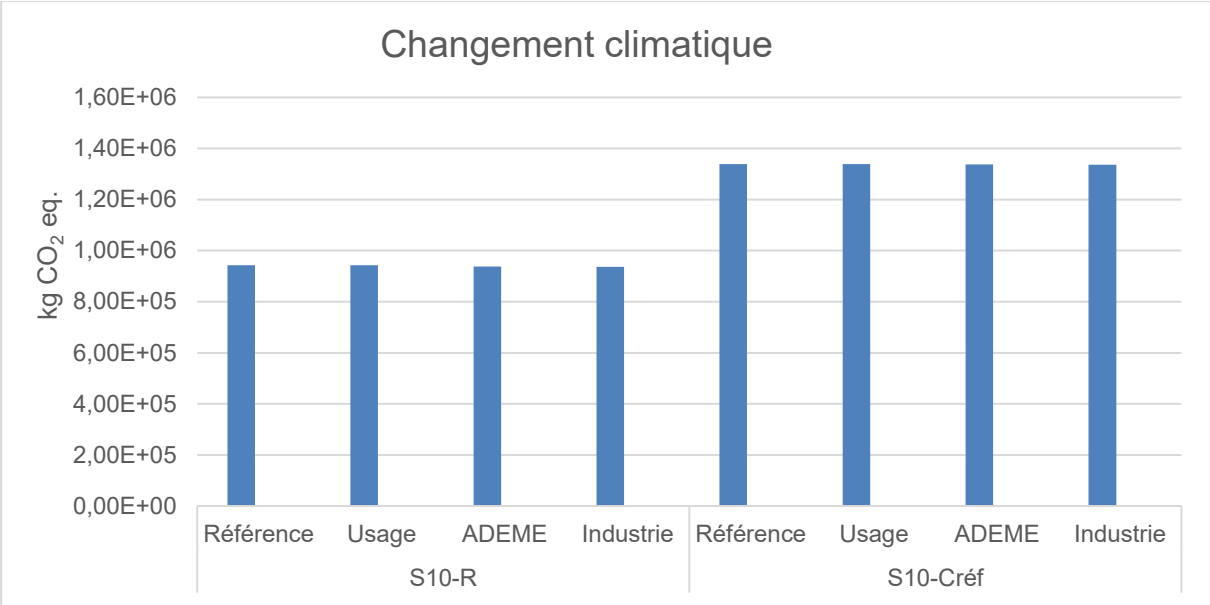


Figure 6-135 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur du changement climatique

Quel que soit le mix considéré, le scénario S10-R sera plus performant que le scénario S10-Créf : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à l'utilisation de gaz naturel. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.1.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur ressources énergétiques :

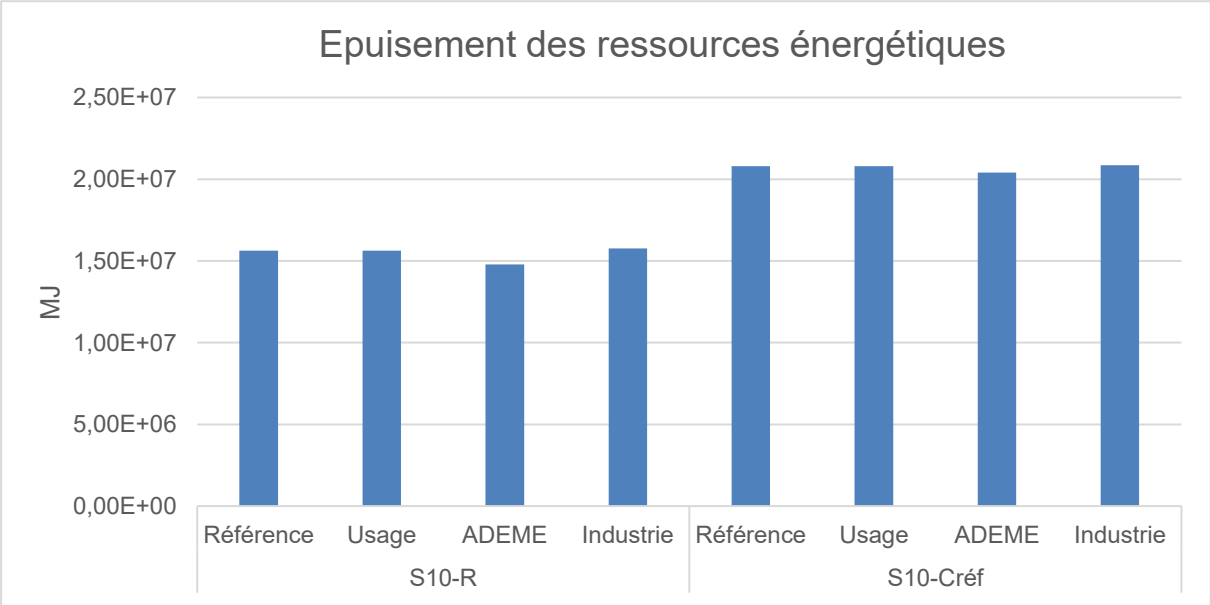


Figure 6-136 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources énergétiques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S10-R sera plus performant que le scénario S10-Créf : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à l'utilisation de gaz naturel. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.1.3 *Ressources minérales et métalliques*

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le mix électrique pour l'indicateur ressources minérales et métalliques :

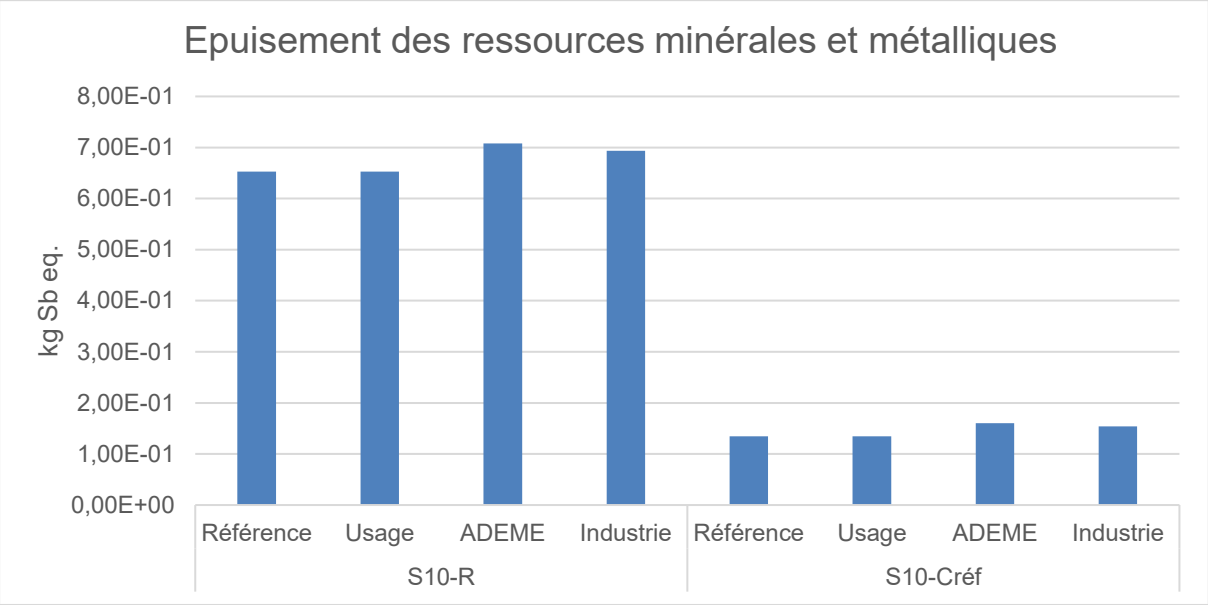


Figure 6-137 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques

Quel que soit le mix considéré, le scénario S10-Créf sera plus performant que le scénario S10-R : ce résultat est logique étant donné que les impacts sont liés à la production des infrastructures. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.2 Analyse de sensibilité sur le taux de couverture solaire

Les hypothèses du scénario S10-R ont été modifiées pour prendre en compte des variations de couverture solaire et challenger les résultats de ce scénario. Les sensibilités ont donc été menées autour de la couverture solaire de de référence de 35% :

- Couverture solaire à 25% : le scénario est composé alors de 1040 capteurs pour une surface solaire de 5512 m² et un volume de stockage de 1000 m^3

- Couverture solaire à 45% : le scénario est composé alors de 1900 capteurs pour une surface solaire de 10070 m² et un volume de stockage de 6000 m^3

Ces consommations d'énergie et dimensionnement de stockage ont été modélisés via TRNSYS par des fournisseurs membres du comité technique.

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 10 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-48 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de couverture solaire sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S10-RC			S10-Créf
		Référence	Couverture solaire à 45%	Couverture solaire à 25%	
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,41E+05	8,81E+05	1,02E+06	1,34E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,58E-01	1,42E-01	1,75E-01	2,28E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	7,85E+04	9,14E+04	6,99E+04	3,20E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	9,75E+02	1,12E+03	9,15E+02	1,01E+03
Particules fines	disease inc.	7,81E-03	1,19E-02	5,32E-03	4,33E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	6,92E-02	1,24E-01	3,28E-02	1,16E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,88E-02	3,45E-02	8,53E-03	3,00E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,15E+03	1,45E+03	9,90E+02	9,72E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,70E+01	9,43E+01	3,29E+01	1,25E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,94E+02	3,58E+02	2,71E+02	2,65E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,24E+03	3,88E+03	2,93E+03	2,95E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,73E+05	4,88E+05	1,31E+05	5,11E+04
Usage des sols	Pt	1,91E+06	2,89E+06	1,20E+06	2,66E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,28E+04	6,30E+04	2,97E+04	1,54E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,56E+07	1,48E+07	1,68E+07	2,08E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,13E-01	9,86E-01	4,27E-01	1,34E-01

6.11.2.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur changement climatique :

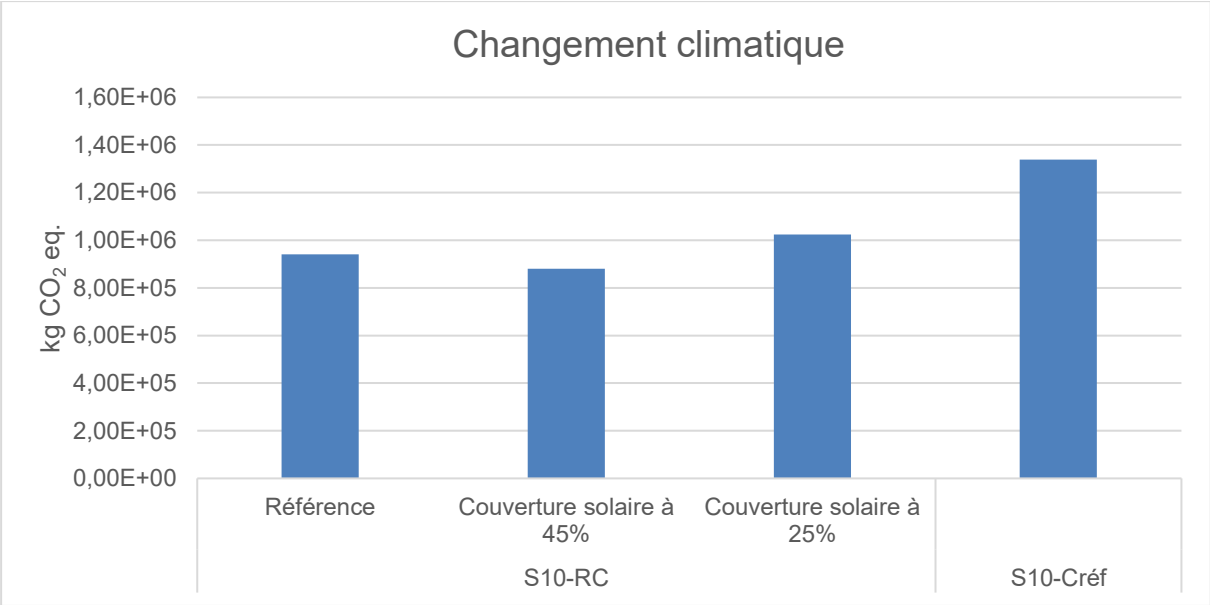


Figure 6-138 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur du changement climatique

Plus le taux de couverture solaire est élevé, plus la quantité de gaz naturel nécessaire pour fournir l'appoint est faible ce qui entraine une diminution des impacts dans cet indicateur.

Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S10-R est plus performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.2.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur ressources énergétiques :

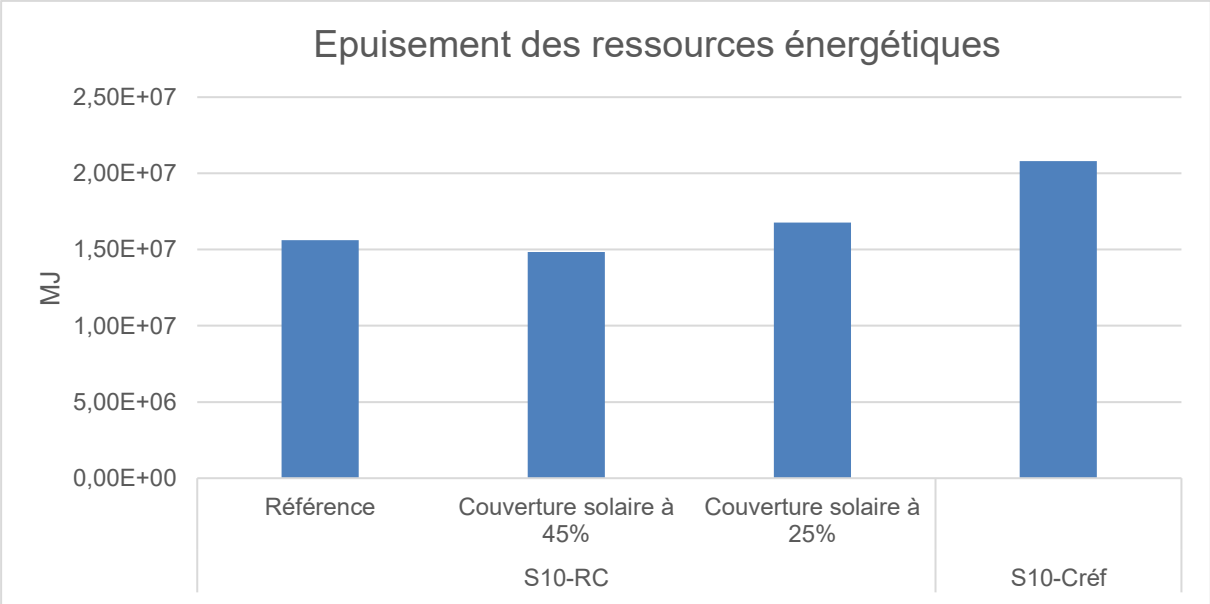


Figure 6-139 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur des ressources énergétiques

L'indicateur ressources énergétiques évolue de la même façon que le changement climatique. Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S10-R est plus performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.2.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de couverture solaire pour l'indicateur ressources minérales et métalliques :

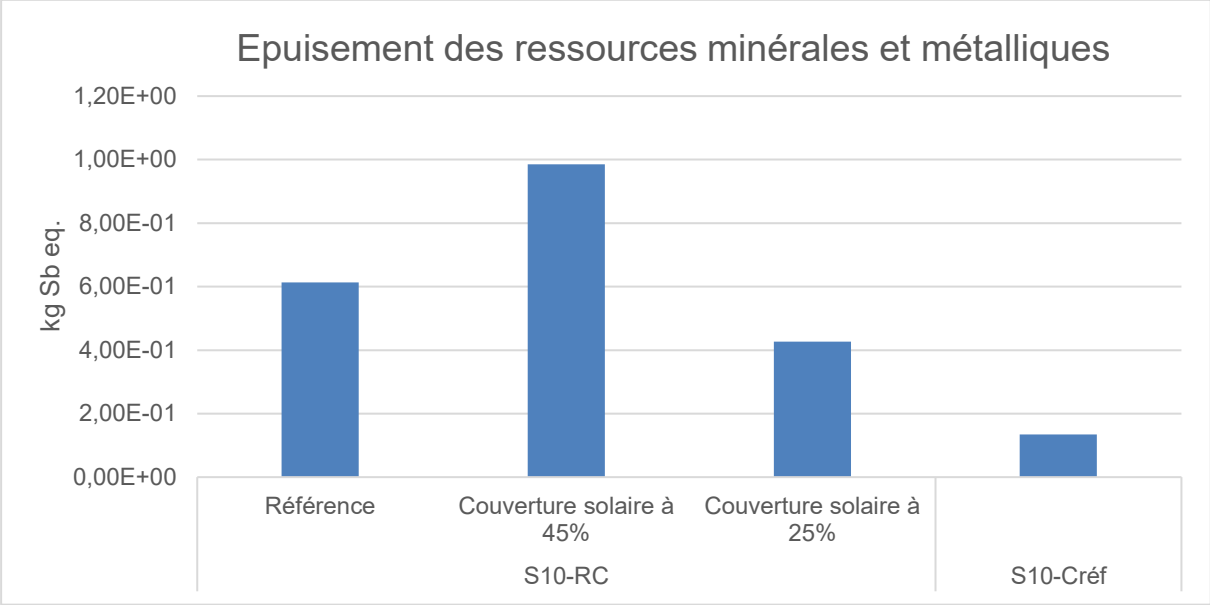


Figure 6-140 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques

Plus le taux de couverture solaire est important, plus la quantité de métaux nécessaire à la production des panneaux solaires et des ballons tampon est grande ce qui entraine une augmentation des impacts dans cet indicateur.

Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S10-R est moins performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.3 Analyse de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des 2 scénarios du cas d'étude 10 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Les panneaux solaires sont modélisés dans le scénario de référence comme étant recyclés en fin de vie à 90% pour les métaux et à 0% pour les autres composants.

Une analyse de sensibilité est menée sur cette hypothèse, en prenant en compte trois autres variantes :

Tableau 6-49 : Cas d'étude 10 : Taux de recyclage des métaux en fin de vie

Taux de recyclage en fin de vie (%)	Référence	Optimiste	Moyen	Pessimiste
Matières métalliques	90%	100%	50%	0%

Autres matières	0%	100%	50%	0%

Tableau 6-50 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S10-R				S10-Créf
		Optimiste	Moyen	Référence	Pessimiste	
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,41E+05	9,42E+05	9,42E+05	9,50E+05	1,34E+06
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,58E-01	1,58E-01	1,58E-01	1,58E-01	2,28E-01
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	7,85E+04	7,85E+04	7,85E+04	7,93E+04	3,20E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	9,75E+02	9,78E+02	9,79E+02	1,00E+03	1,01E+03
Particules fines	disease inc.	7,81E-03	7,88E-03	7,91E-03	8,35E-03	4,33E-03
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	6,92E-02	6,92E-02	6,91E-02	6,93E-02	1,16E-02
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	1,88E-02	1,89E-02	1,89E-02	1,98E-02	3,00E-03
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,15E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,21E+03	9,72E+02
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,70E+01	5,75E+01	5,75E+01	6,18E+01	1,25E+01
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,94E+02	3,01E+02	3,01E+02	3,53E+02	2,65E+02
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,24E+03	3,25E+03	3,26E+03	3,33E+03	2,95E+03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,73E+05	2,74E+05	2,74E+05	2,85E+05	5,11E+04
Usage des sols	Pt	1,91E+06	1,90E+06	1,89E+06	1,91E+06	2,66E+05
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	4,28E+04	4,29E+04	4,29E+04	4,34E+04	1,54E+04
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,56E+07	1,56E+07	1,56E+07	1,57E+07	2,08E+07
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	6,13E-01	6,52E-01	6,53E-01	1,01E+00	1,34E-01

6.11.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur changement climatique :

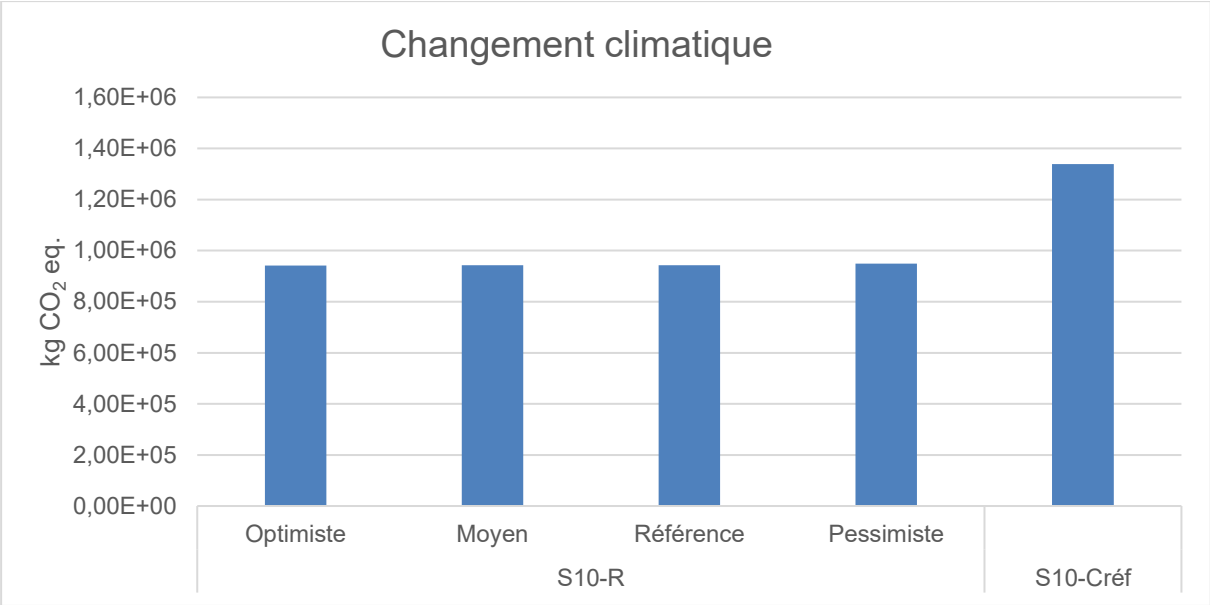


Figure 6-141 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur du changement climatique

Le taux de recyclage des panneaux a une faible influence sur les résultats finaux.

Quel que soit le taux de recyclage des panneaux solaires considéré, le scénario S10-R est plus performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.3.2 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur ressources énergétiques :

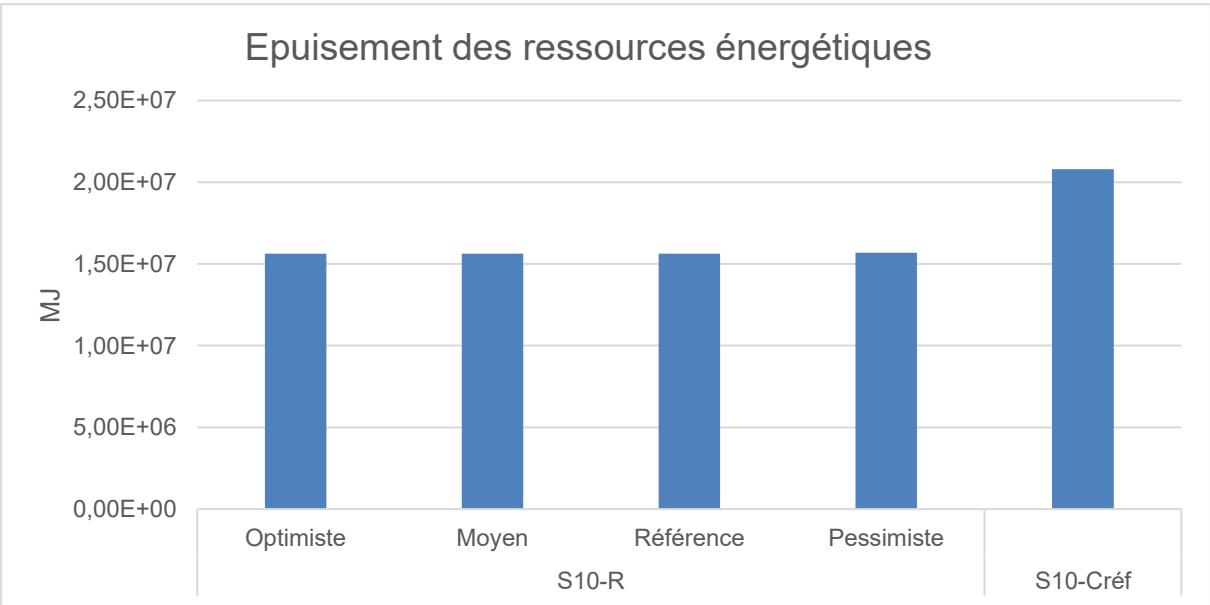


Figure 6-142 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur des ressources énergétiques

Le taux de recyclage des panneaux a une faible influence sur les résultats finaux.

Quel que soit le taux de recyclage des panneaux solaires considéré, le scénario S10-R est plus performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.3.3 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les résultats des analyses de sensibilité sur le taux de recyclage des panneaux solaires pour l'indicateur ressources minérales et métalliques :

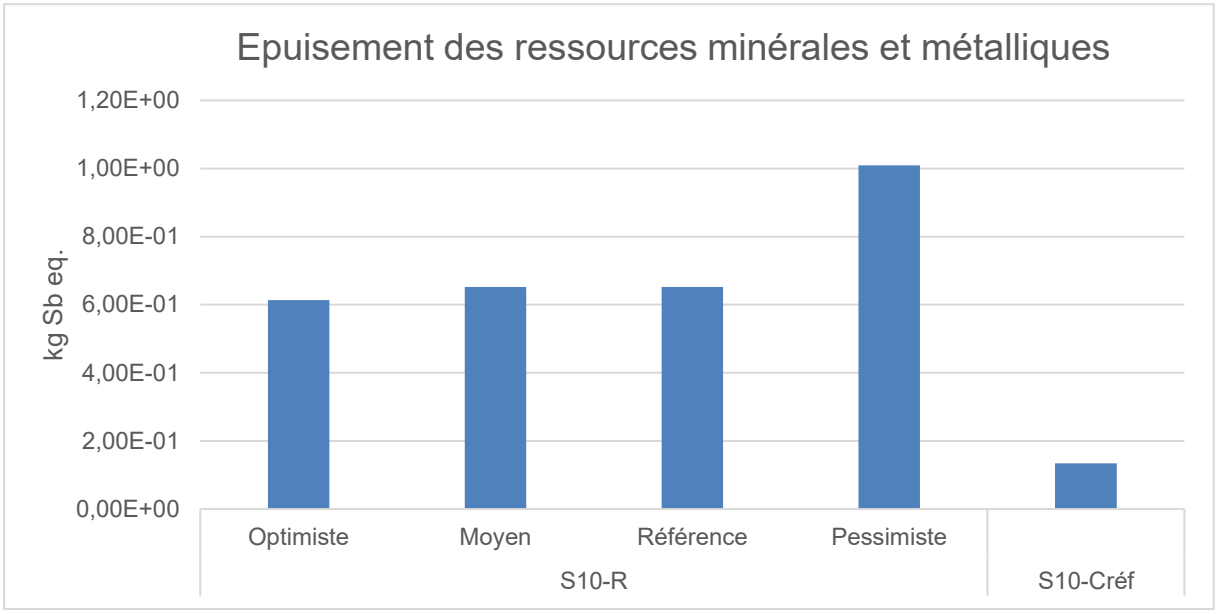


Figure 6-143 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques

Plus le taux de couverture solaire est important, plus la quantité de métaux nécessaire à la production des panneaux solaires et des ballons tampon est grande ce qui entraine une augmentation des impacts dans cet indicateur.

Quel que soit le taux de couverture solaire considéré, le scénario S10-R est moins performant que le scénario S10-Créf. Les conclusions générales ne sont donc pas modifiées.

6.11.4 Conclusions sur les analyses de sensibilité sur le cas d'étude 10

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 10 est présentée dans le tableau suivant. Trois analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 10, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Tableau 6-51 : Cas d'étude 10 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Couverture solaire (uniquement dans S10-R)	Taux de recyclage des panneaux solaires (uniquement dans S10-R)
	Chauffage	ADEME	Industrie		
Changement climatique					
Epuisement des ressources énergétiques					

Epuisement des ressources minérales et métalliques					

Les analyses de sensibilité dans le scénario 10 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : quel que soit le mix et l'indicateur considéré, la hiérarchie entre les scénarios n'est pas modifiée ;
- **Taux de couverture solaire** : un changement de taux de couvertures solaire à plus ou moins 10% du scénario solaire ne modifie pas la hiérarchie entre les différents scénarios. Cependant, l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques est très lié à ce paramètre ;
- **Taux de recyclage des panneaux solaires** : un changement de taux de recyclage des panneaux solaires ne modifie pas la hiérarchie entre les différents scénarios. Cependant, l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques est très lié à ce paramètre.

6.12 Cas d'étude 11

Pour le cas d'étude 11, les analyses de sensibilités suivantes ont été menées :

- Mix considéré pour les équipements de chauffage : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Pour le scénario S11-RC1, la nature du réfrigérant est changée.

6.12.1 Analyse de sensibilité sur le mix électrique

Le tableau suivant fournit l'impact de chacun des trois scénarios du cas d'étude 11 sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne par scénario, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-52 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint

Indicateur	Unité	S11-RC			S11-Cref			S11-Dref		
		Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,67E+06	4,06E+06	2,33E+06	1,60E+07	1,60E+07	1,60E+07	1,82E+07	1,82E+07	1,82E+07
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	1,08E+00	1,05E+00	7,36E-01	2,76	2,76	2,76	2,89E+00	2,89E+00	2,89E+00
Rayonnements ionisants	kBq U-235 eq	5,98E+06	4,25E+06	2,22E+06	8,92E+05	8,92E+05	8,92E+05	3,62E+04	3,62E+04	3,62E+04
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	5,23E+03	8,87E+03	4,82E+03	1,33E+04	1,33E+04	1,33E+04	1,40E+04	1,40E+04	1,40E+04
Particules fines	disease inc.	1,03E-01	8,82E-02	1,53E-01	6,30E-02	6,30E-02	6,30E-02	4,67E-02	4,67E-02	4,67E-02
Toxicité, effets non-cancérogènes	CTUh	2,81E-01	3,82E-01	3,23E-01	1,87E-01	1,87E-01	1,87E-01	1,31E-01	1,31E-01	1,31E-01
Toxicité, effets cancérogènes	CTUh	6,47E-02	6,72E-02	7,38E-02	4,32E-02	4,32E-02	4,32E-02	2,75E-02	2,75E-02	2,75E-02
Acidification, terrestre et eau douce	mol H+ eq	1,02E+04	1,54E+04	1,76E+04	1,32E+04	1,32E+04	1,32E+04	1,20E+04	1,20E+04	1,20E+04
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	5,53E+02	9,08E+02	4,67E+02	2,28E+02	2,28E+02	2,28E+02	1,66E+02	1,66E+02	1,66E+02
Eutrophisation, marine	kg N eq	2,18E+03	3,22E+03	2,01E+03	3,65E+03	3,65E+03	3,65E+03	3,26E+03	3,26E+03	3,26E+03
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	3,37E+04	3,12E+04	6,88E+04	4,13E+04	4,13E+04	4,13E+04	3,55E+04	3,55E+04	3,55E+04
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	1,32E+06	1,47E+06	1,40E+06	8,19E+05	8,19E+05	8,19E+05	5,54E+05	5,54E+05	5,54E+05
Usage des sols	Pt	1,98E+07	1,10E+07	3,15E+07	8,02E+06	8,02E+06	8,02E+06	3,39E+06	3,39E+06	3,39E+06

Indicateur	Unité	S11-RC			S11-Cref			S11-Dref		
		Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME	Réf.	Usage	ADEME
Epuisement des ressources, eau	m3 depriv.	1,43E+06	1,25E+06	7,98E+05	3,44E+05	3,44E+05	3,44E+05	1,38E+05	1,38E+05	1,38E+05
Epuisement des ressources, énergie fossile	MJ	1,57E+08	1,40E+08	7,66E+07	2,59E+08	2,59E+08	2,59E+08	2,59E+08	2,59E+08	2,59E+08
Epuisement des ressources, minérales et métalliques	kg Sb eq	4,79E+00	5,66E+00	1,04E+01	2,65	2,65	2,65	2,47E+00	2,47E+00	2,47E+00

6.12.1.1 Changement climatique

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 11 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier le mix électrique.

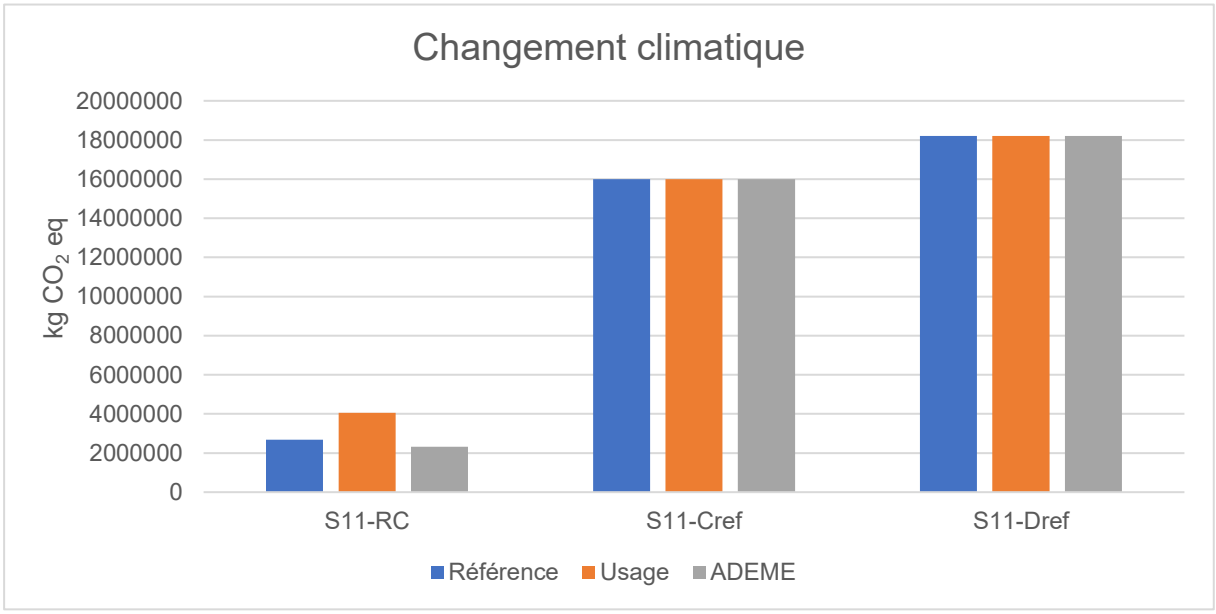


Figure 6-144 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution sur le scénario PAC utilisant le plus d'électricité (S11-RC), avec une multiplication par 1,5 de l'impact du scénario S11-RC lors de la modélisation avec le mix Usage ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Une variation du mix électrique n'est donc pas à même de modifier les conclusions établies en ce qui concerne le classement entre les différentes solutions techniques comparées.

6.12.1.2 Particules fines

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 11 sur l'indicateur de particules fines en faisant varier le mix électrique.

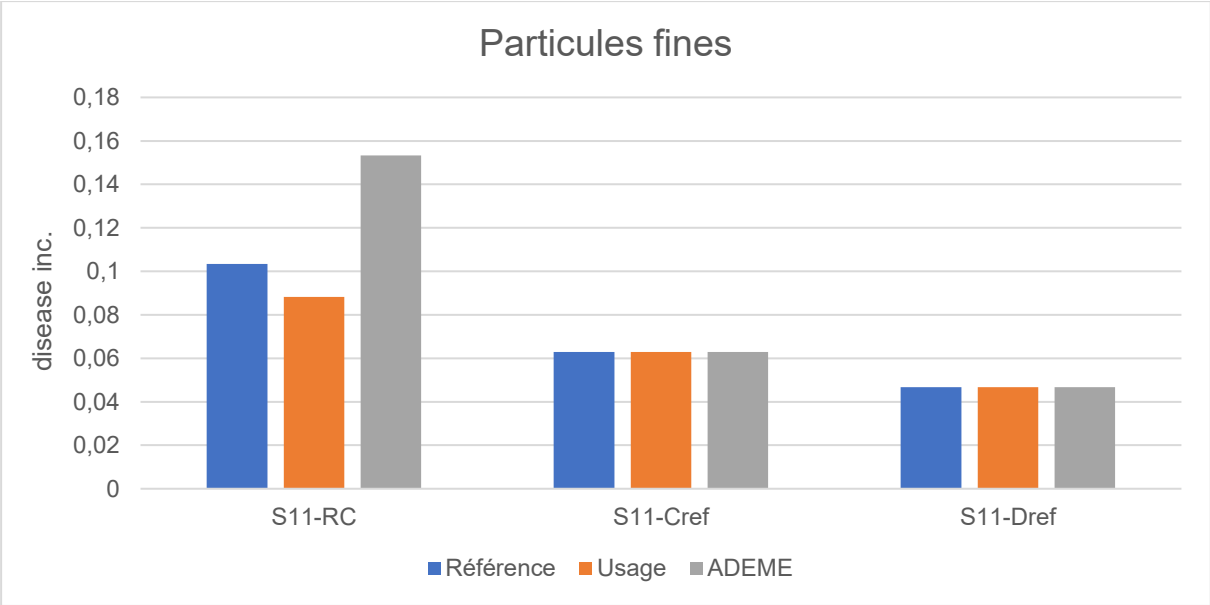


Figure 6-145 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur le scénario PAC utilisant le plus d'électricité (S11-RC), avec un impact augmenté de 30 % lors de la modélisation avec le mix ADEME. Ceci s'explique par l'utilisation de manière plus importante des centrales à biogaz dans le mix électrique ADEME (impact de la digestion anaérobie du fumier et émissions d'ammoniac dans l'air dues à l'hypothèse conservatrice de stockage en plein air des substrats et du digestat) ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe entre les impacts des mix Usage et ADEME ;

À noter que cette analyse ne concerne que le mix électrique et non le mix gaz. Les impacts de la chaudière gaz dépendent aussi du type de gaz utilisé (par ex : biogaz), l'influence du mix gaz n'est pas étudiée ici.

Cette analyse ne remet pas en cause les conclusions sur le classement des différents systèmes, le système à base de PAC provoque une émission plus importante de particules fines.

6.12.1.3 Epuisement des ressources énergétiques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 11 sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques en faisant varier le mix électrique.

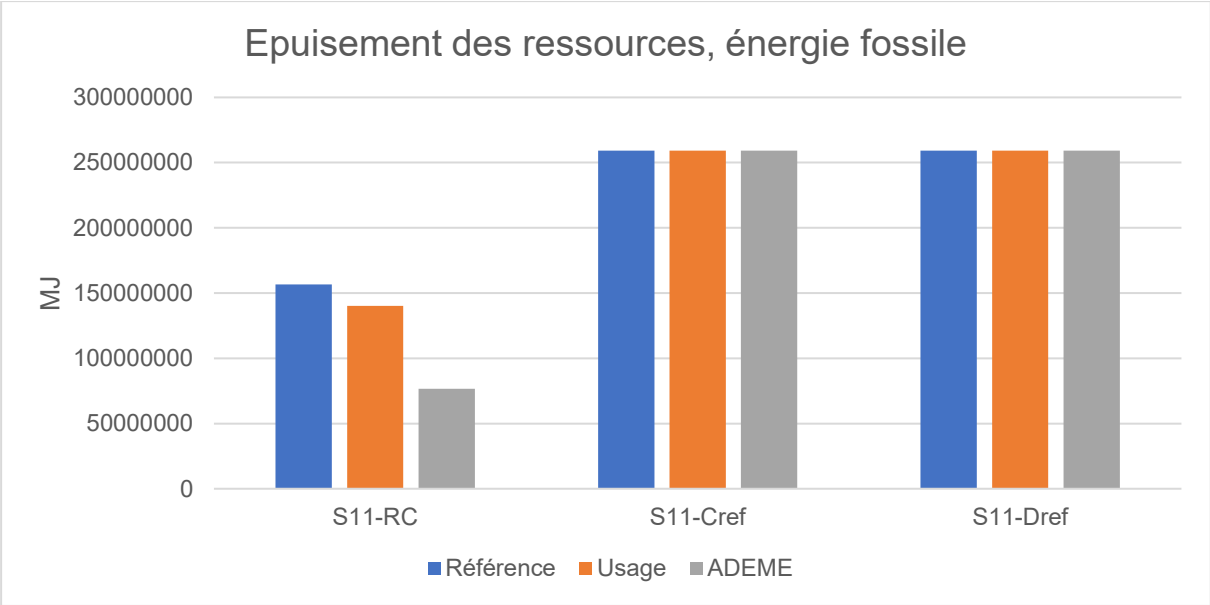


Figure 6-146 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur le scénario PAC utilisant le plus d'électricité (S11-RC), avec un impact diminué de moitié lors de la modélisation avec le mix ADEME ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe au-dessus des impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique au scénario de référence.

Une variation du mix électrique n'est donc pas à même de modifier les conclusions établies en ce qui concerne le classement entre les différentes solutions techniques comparées sur cet indicateur.

6.12.1.4 Epuisement des ressources, minérales et métalliques

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque scénario du cas d'étude 11 sur l'indicateur d'épuisement des ressources, minérales et métalliques en faisant varier le mix électrique.

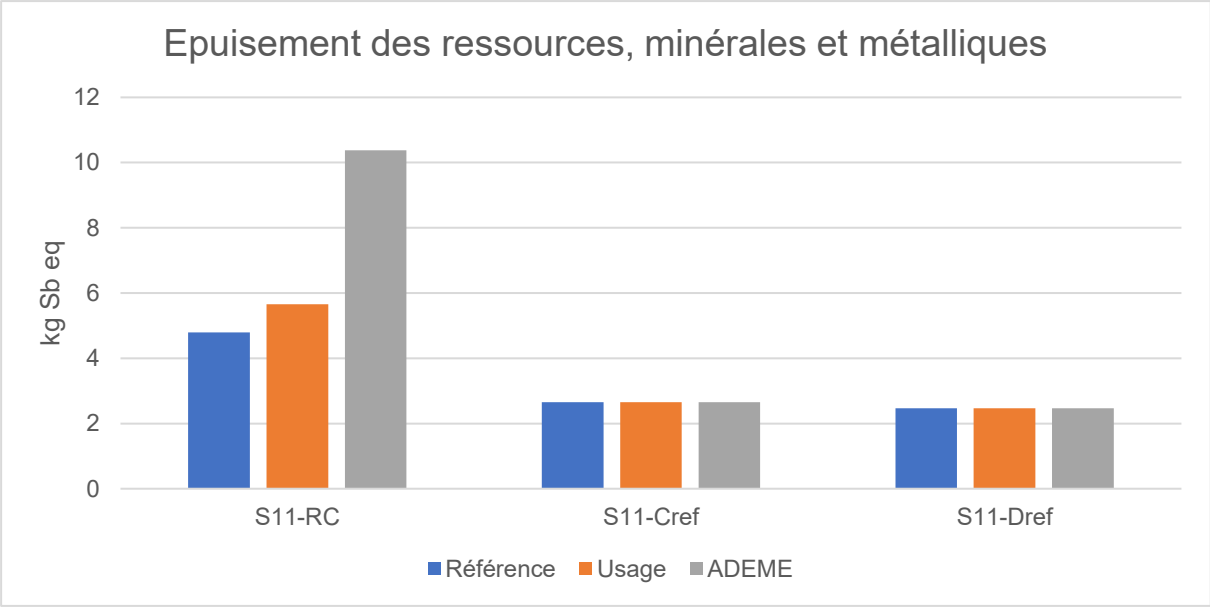


Figure 6-147 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques

L'analyse de sensibilité permet de faire les observations suivantes :

- Evolution importante sur le scénario PAC utilisant le plus d'électricité (S11-RC), avec un impact multiplié par 2 lors de la modélisation avec le mix ADEME lors de modélisation avec le mix ADEME ;
- Très faibles évolutions sur les scénarios avec chaudière gaz ;
- L'impact du mix de référence se situe en dessous des impacts des mix Usage et ADEME ;
- Le classement entre les scénarios est identique.

L'évolution de l'impact sur les scénarios utilisant le plus d'électricité est lié à l'épuisement des ressources induit par l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Les conclusions affirmées restent exactes, l'écart entre le scénario PAC et les scénarios avec chaudières gaz est encore plus important lorsque l'on modélise avec le mix ADEME.

6.12.2 Analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant

Le changement de réfrigérant peut impliquer un léger redimensionnement / changement des performances des équipements, ce qui n'a pas été considéré dans cette analyse de sensibilité. Seule la nature du réfrigérant a été modifiée, en conservant les performances initiales. Dans le cas de l'analyse de sensibilité sur le réfrigérant, seul l'indicateur changement climatique sera étudié car seul le PRG du réfrigérant a été modifié pour du R134 à la place du R1234ze.

Le tableau suivant fournit l'impact des trois scénarios du cas d'étude 11 concernés par les réfrigérants sur chacun des impacts midpoints considérés. Pour chaque ligne, la valeur la plus faible est colorée en vert, elle indique le scénario avec la meilleure performance environnementale sur l'indicateur considéré. De même, la valeur la plus élevée est colorée en rouge, elle indique le système avec la moins bonne performance environnementale sur l'indicateur considéré.

Tableau 6-53 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés

Indicateur	Unité	S11-RC		S11-Cref	S11-Dref
		Référence - R1234-ze	R134-a	Référence	Référence
Changement climatique	kg CO_2 eq	2,67E+06	2,97E+06	1,60E+07	1,82E+07

La figure ci-dessous fournit la contribution relative des trois scénarios du cas d'étude 11 sur l'indicateur de changement climatique en faisant varier la nature du réfrigérant.

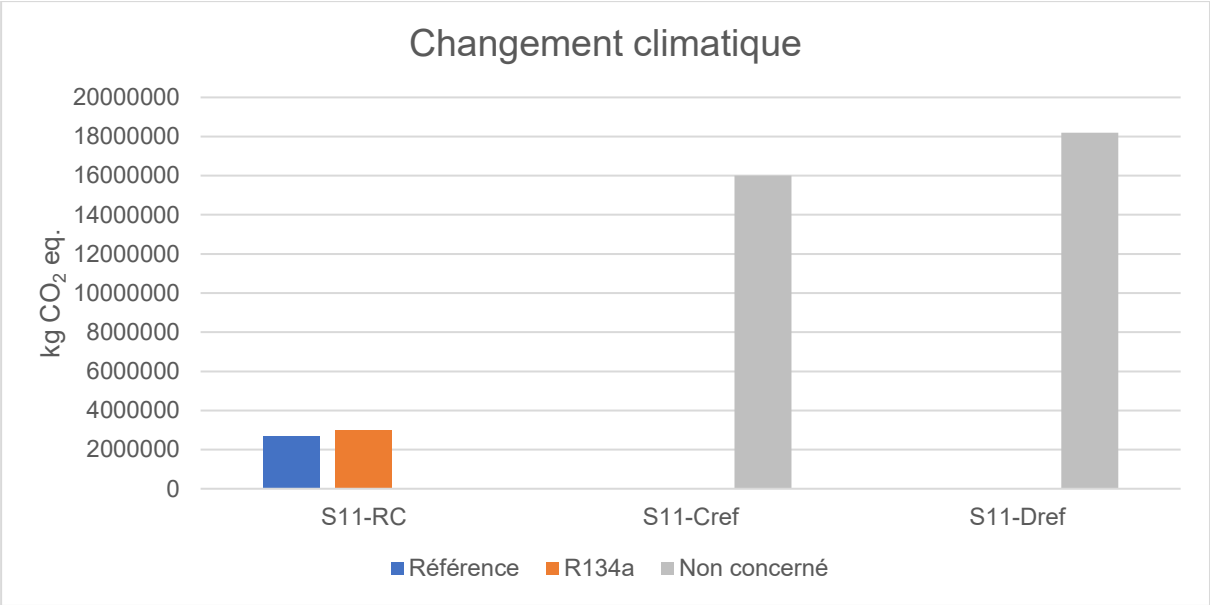


Figure 6-148 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique

L'analyse de sensibilité permet de montrer que les évolutions sont négligeables vis-à-vis des incertitudes en ACV sur le scénario RC. Les conclusions affirmées restent exactes, l'écart entre le scénario PAC et les scénarios avec chaudières gaz est toujours aussi important lorsque l'on modélise avec des types de réfrigérant différents.

6.12.3 Conclusions sur les analyses de sensibilités du cas d'étude 11

L'influence des différents paramètres dans le cas d'étude 11 est présentée dans le tableau suivant. Deux analyses de sensibilité ont été réalisées pour le cas d'étude 11, pour vérifier que les conclusions présentées sont robustes. Le tableau suivant présente de manière synthétique l'influence des paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios comparés dans le cas d'étude, via un code couleur :

- Vert : la hiérarchie n'est pas modifiée, quelles que soient les valeurs prises par le paramètre sur lequel l'analyse de sensibilité a été réalisée ;
- Orange : la hiérarchie est modifiée pour certaines valeurs extrêmes du paramètre, mais pas pour d'autres ;
- Rouge : la hiérarchie est modifiée quelle que soit la valeur du paramètre.

Dans le cas du réfrigérant, seul le changement climatique a été considéré (les cases pour les autres indicateurs sont donc grisées).

Tableau 6-54 : Cas d'étude 11 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios

	Mix			Nature du réfrigérant
	Usage	ADEME	Clim.	
Changement climatique				
Particules fines				
Epuisement des ressources énergétiques				
Epuisement des ressources minérales et métalliques				

Les analyses de sensibilité dans le scénario 1 ont permis de souligner les points suivants :

- **Mix électrique** : le fait de modifier le mix n'entraîne aucun basculement entre les scénarios à base de PAC et de chaudières gaz. Une évolution à la hausse a lieu avec le mix ADEME sur les indicateurs d'émissions de particules fines et d'épuisement de ressources (minérales et métalliques), et une évolution à la baisse sur les ressources énergétiques. Les évolutions sur le changement climatique sont très faibles quant à elles vis-à-vis de la comparaison avec les scénarios avec chaudières gaz. Les évolutions avec le mix Usage sont très faibles sur chacun des indicateurs.
- **Nature du réfrigérant** : un changement de la nature du réfrigérant ne modifie pas la hiérarchie entre les chaudières gaz et les PAC.

7 Analyses d'incertitude

7.1 Eléments communs à tous les cas d'étude

Les calculs réalisés dans le cadre d'une ACV sont empreints d'incertitudes, comme des incertitudes de mesure ou de représentativité de données. On peut donc se demander si les écarts entre les différents scénarios d'un même cas d'étude sont suffisamment significatifs au regard de l'incertitude des modèles ACV utilisés. Dans ce chapitre, nous avons donc réalisé une propagation d'incertitude dans le but de déterminer s'il est bien possible de départager ces scénarios en tenant compte de l'incertitude.

Cette analyse d'incertitude nécessitant un travail assez conséquent, elle n'est réalisée que pour les cas d'étude où le système étudié a des impacts proches de ceux d'un des systèmes de référence auxquels il est comparé. Ainsi, les analyses d'incertitude sont réalisées sur les cas d'étude suivants :

- Cas d'étude 1
- Cas d'étude 2
- Cas d'étude 3
- Cas d'étude 6
- Cas d'étude 7

7.1.1 Méthode de calcul de l'incertitude

La propagation d'incertitudes a été réalisée avec la méthode de Monte Carlo, qui consiste à définir les incertitudes des paramètres d'entrée du modèle sous la forme de distributions de probabilité, puis à réaliser un nombre important de simulations en tirant au sort la valeur de chaque paramètre. On obtient alors une distribution sur les résultats d'indicateurs, qui permet d'avoir une idée de la variabilité de ces résultats. Une même donnée peut influencer les résultats de plusieurs scénarios en même temps : pour chaque tirage, les résultats de tous les scénarios ont été calculés en même temps, ce qui permet de tenir compte des corrélations. Une étude SCORE LCA sur les incertitudes en ACV [55] rappelle que l'erreur obtenue à partir de 10 000 itérations est inférieure à 0.1% mais conseille, au vu des temps de calcul importants, de prendre au moins 1000 simulations. Dans cette étude, 2000 itérations ont été effectuées par analyse d'incertitude.

Afin de réaliser une analyse de Monte Carlo, les informations concernant les incertitudes doivent être exprimées en profils de distribution. Dans SimaPro [13], il y a quatre distributions différentes :

- Intervalle : intervalle à deux valeurs à équiprobabilité d'occurrence
- Triangulaire : intervalle de valeurs extrêmes par rapport à la valeur de référence avec une distribution triangulaire
- Loi Normale : profil gaussien de distribution autour de la valeur de référence
- Loi Lognormal : profil corrigé pour omettre les valeurs négatives

La propagation d'incertitude réalisée ne concerne que certaines données primaires collectées dans le cadre de l'étude, et les données d'inventaires issues de la base de données ecoinvent 3.5. Les paramètres qui ont été soumis à l'analyse d'incertitudes sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7-1 : Incertitude modélisée pour les paramètres d'entrées du modèle

Paramètre	Loi d'incertitude	Paramétrage de la loi
Efficacité énergétique des équipements thermodynamiques	Triangle	-30 % / +10 %
Rendement des équipements thermiques	Triangle	-5 % / +2 %
Quantité de glycol	Triangle	-43 % / +14 %
Fuites de réfrigérant (installation et usage)	LogNormal	Std 1.24
Durées de vie des équipements	Triangle	-6 % / +6 %

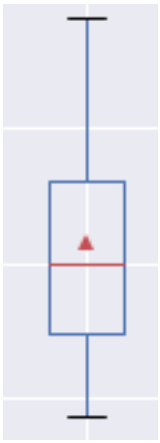
Les lois de distributions ont été établies après itérations avec Tractebel, responsable de la majorité des estimatifs.

Les valeurs de paramétrage de ces lois ont été choisies pour les raisons suivants :

- Pour les équipements thermodynamiques, nous avons consulté la documentation technique de plusieurs équipements, pour identifier les valeurs extrêmes. Nous avons alors supposé que l'incertitude sur ce paramètre suivait une loi de distribution en triangle. Le COP max intervient dans la formule de COP annuel, pour lequel nous avons donc également définit une loi triangle (asymétrique).
- Pour le rendement de chaudières, il est généralement compris entre 85% et 92% pour une chaudière d'appoint par exemple. La valeur de 90 % ayant été prise dans le modèle par défaut, une loi triangle a également été utilisée.
- Concernant les quantités de glycol, nous avons considéré dans le modèle de référence que le mélange eau glycolée était constitué de 35% de glycol : ce ratio peut aller jusqu'à 40% dans des zones très froides, ou au contraire diminuer jusqu'à 20% dans des zones plus tempérées (source : expertise Tractebel). Il existe même des cas où il n'est pas nécessaire d'utiliser du glycol.

7.1.2 Présentation des résultats d'incertitude

Les résultats sont présentés sous la forme de « boites à moustaches », dont le principe est présenté dans la figure ci-dessous :



− 95ème centile : un résultat supérieur à cette valeur est obtenu pour 5% des simulations.

− 3ème quartile : un résultat supérieur à cette valeur est obtenu pour 25% des simulations.
▲ Moyenne arithmétique
− Médiane : valeur qui sépare l'échantillon en deux : pour la moitié des simulations, le résultat est supérieur, et il est inférieur pour l'autre moitié.
− 1er quartile : un résultat inférieur à cette valeur est obtenu pour 25% des simulations.

− 5ème centile : un résultat inférieur à cette valeur est obtenu pour 5% des simulations.

Figure 7-1 : Principe de « boîte à moustaches » pour la représentation des incertitudes.

Pour chaque cas d'étude, les calculs d'incertitude sont présentés uniquement pour les indicateurs identifiés comme pertinents au § 4.4.2. Lorsque les plages d'incertitude des résultats de deux systèmes se chevauchent, il est impossible de départager ces systèmes sur la base de ce seul graphique. Il faut alors analyser la distribution de probabilité de l'écart entre les deux systèmes.

Ainsi, pour chaque indicateur analysé, un second graphique est réalisé lorsque les « boites à moustaches » de deux systèmes se chevauchent, pour faire apparaître un ratio entre les deux résultats. Une valeur de ce ratio supérieur à 100% signifie que le premier système a un impact plus élevé que le second, et inversement. On peut alors regarder le nombre de simulations où ce ratio est supérieur à 100%, et le nombre de simulations où il est inférieur à 100%, et en tirer des enseignements.

7.1.3 Limites des calculs d'incertitude réalisés

Etant donnée la quantité très importante de données d'entrée dans les modèles ACV, il est cependant impossible de prendre en compte toutes les sources d'incertitudes de ces résultats. D'autres sources d'incertitude potentiellement importantes ne sont donc pas prises en compte :

- Les hypothèses générales de modélisation ne sont pas modifiées dans l'analyse d'incertitude : il s'agit des facteurs d'allocations utilisés pour répartir les impacts d'une activité entre ses différents co-produits, ou des facteurs utilisées pour répartir les impacts entre producteur de matière à recycler et utilisateur de matière recyclée. Ces hypothèses ne sont pas modifiées ici.

- L'incertitude des facteurs de caractérisation n'est pas prise en compte : bien que ces facteurs soient incertains (voire très incertains pour certaines catégories d'impact), il n'est à ce jour pas possible de réaliser de propagation d'incertitude sur ces facteurs.
- Pour les données ecoinvent de type « market for », qui contiennent la répartition entre différentes filières de production d'un même produit, aucune incertitude dans cette répartition n'est disponible. Elle ne peut donc pas être propagée. C'est notamment le cas pour les mix électriques : la répartition entre les différentes filières de production est identique à celle utilisée dans le modèle de référence (voir description au § 4.1.2.2). L'incertitude dans les flux élémentaires de chaque filière de production (ex : émission de CO_2 dans l'air par kWh d'électricité produite à partir d'une turbine à combustion gaz) a en revanche bien été prise en compte, telle qu'elle est modélisée dans ecoinvent.
- Les quantités de chaleur ou de froid à produire par les systèmes sont également considérées fixes : ces quantités (puissance thermique chaude ou froide à chaque heure de l'année) ont été calculées avec un outil indépendant du logiciel de modélisation ACV. Il n'a pas été possible de réaliser un couplage entre les deux outils pour propager les incertitudes dans les deux modèles à la fois.
- L'incertitude en ce qui concerne la composition matière des systèmes n'est que partiellement prise en compte. Seule l'incertitude de la durée de vie de l'équipement est modélisée. Les incertitudes dans la masse mise en œuvre pour chaque composant ne sont pas modélisées, car la définition d'un profil de distribution pour chaque valeur collectée aurait été trop chronophage.

Ce calcul d'incertitude a donc une portée limitée : la distribution obtenue n'est pas représentative de l'ensemble des incertitudes possibles dans le calcul ACV. Cependant, nous estimons que cette approche simplifiée permet tout de même d'apporter des informations intéressantes sur les résultats obtenus. On peut notamment observer que l'incertitude des résultats de certains systèmes est assez élevée. Il aurait été nécessaire de faire un calcul d'analyse de sensibilité globale pour identifier les paramètres les plus influents et collecter des valeurs moins incertaines pour ces paramètres. Ce travail n'a pas été réalisé dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible d'expliquer les sources principales des incertitudes.

7.2 Cas d'étude 1

Rappel des configurations des scénarios :

- S1-RC1 : réseau de chaleur alimenté par une PAC sur sondes géothermiques verticales ;
- S1-RC2 : réseau de chaleur alimenté par une PAC sur aquifère ;
- S1-Cref : réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
- S1-Dref1 : chaudières gaz par bâtiment ;
- S1-Dref2 : PAC aérothermique par bâtiment.

7.2.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « changement climatique ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

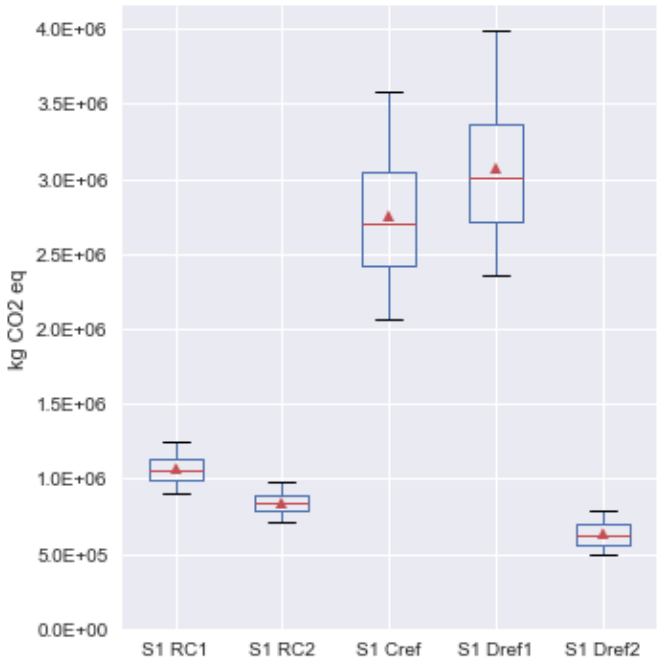


Figure 7-2 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur changement climatique : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de chaudières à gaz, centralisé (S1-Cref) et décentralisé (S1-Dref1). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la combustion ou l'approvisionnement en gaz naturel, qui sont les principales contributrices aux impacts de ces systèmes.

L'incertitude sur les systèmes à base de PAC est plus faible, mais ces résultats ont été calculés à mix électrique constant.

Le classement global entre les systèmes étudiés et les systèmes de référence n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.2.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « acidification terrestre et eau douce ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau II selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle est d'un niveau de robustesse scientifique satisfaisant, mais qu'elle peut être améliorée pour représenter plus fidèlement ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 30% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

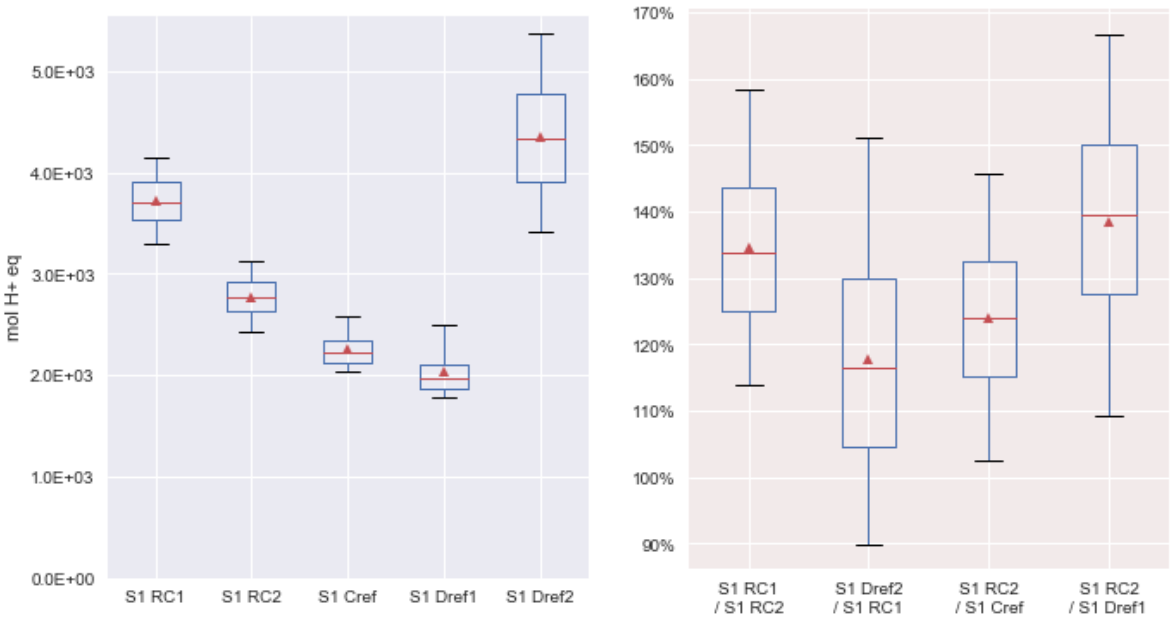


Figure 7-3 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On observe une plage d'incertitude assez étendue pour les systèmes à base de pompe à chaleur, en particulier pour le système à base de PAC air/eau par bâtiments. SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est l'élément le plus contributeur de ces systèmes.

Les plages d'incertitudes de plusieurs systèmes se chevauchent ou sont très proches compte tenu de l'écart de l'ordre de 30% nécessaire pour départager 2 systèmes. En analysant la figure de droite, on peut faire plusieurs constatations :

- Pour l'ensemble des simulations, le système S1-RC1 (PAC centralisé sur sondes géothermiques) a un impact supérieur à celui du système S1-RC2 (PAC centralisé sur aquifère) (PAC air/eau par bâtiment). Si on considère par contre qu'un écart de l'ordre de 30% est nécessaire pour départager ces deux systèmes, on observe que ce seuil n'est dépassé que dans un peu plus de 50% des cas.
- Le système S1-Dref2 a des impacts supérieurs à ceux du système S1-RC1 pour une grande majorité des simulations (plus de 75%). Cependant, ils dépassent le seuils de 30% uniquement pour moins de 25% des simulations. Dans plus de 75% des cas, les écarts entre ces deux systèmes ne sont pas suffisants pour les départager sans une analyse des flux les plus contributeurs, qui n'a pas été réalisée ici.
- Le système S1-RC2 a des impacts supérieurs à ceux du système S1-Cref dans tous les simulations, mais l'écart entre ces deux systèmes est supérieur à 30% dans un peu moins de 25% des cas.
- Les écarts entre S1-RC2 et S1-Dref1 sont supérieurs à 30% dans un peu moins de 75% des simulations. Dans les autres cas, les impacts calculés pour S1-RC2 restent supérieurs à ceux de S1-Dref1, mais ils restent dans la marge d'incertitude de la méthode de caractérisation.

Comte-tenu de cette analyse d'incertitude, on peut considérer que le classement établi au § 5.2.3.3 n'est pas remis en cause :

- Les systèmes à base de chaudières gaz (S1-Dref1 et S1-Cref) sont ceux qui causent le moins d'impact, et ont une performance qui peut être considérée comme équivalente sur cet indicateur.
- Le système S1-RC2 (PAC centralisé sur aquifère) a des impacts légèrement supérieurs à ceux des systèmes S1-Dref1 et S1-Cref.
- Les systèmes S1-RC1 et S1-Dref2 sont ceux qui causent le plus d'impacts sur cet indicateur, et peuvent être considérés comme équivalents.

7.2.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Particules fines ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

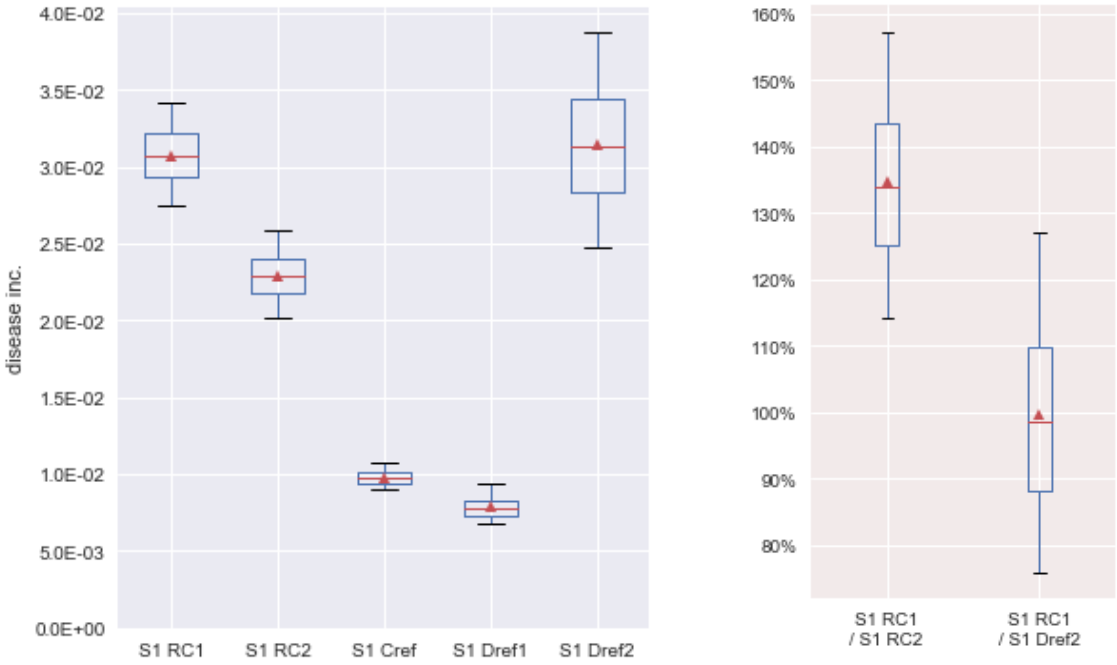


Figure 7-4 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On observe une plage d'incertitude assez étendue pour les systèmes à base de pompe à chaleur, en particulier pour le système à base de PAC air/eau par bâtiments. SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée.

Les plages d'incertitudes des deux systèmes à base de PAC, S1-RC1 et S1-Dref2 se chevauchent. En analysant la figure de droite, on peut faire les observations suivantes :

- Le système S1-RC1 a des impacts supérieurs de plus de 10% à ceux du systèmes S1-RC2 pour l'ensemble des simulations.
- Les écarts entre les systèmes S1-RC1 et S1-Dref2 sont compris entre +/- 10% dans environ 50% des cas. Dans 25% des cas, S1-RC1 a des impacts 10% supérieurs à S1-Dref2, et dans environ 25% des cas, c'est S1-Dref2 qui a des impacts 10% supérieurs à S1-RC1. Ces deux systèmes doivent donc être considérés comme strictement équivalents en matière d'émissions de particules fines.

Le classement obtenu au § 5.2.3.2 n'est donc pas remis en cause par cette analyse d'incertitude.

7.2.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources énergétiques ». Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

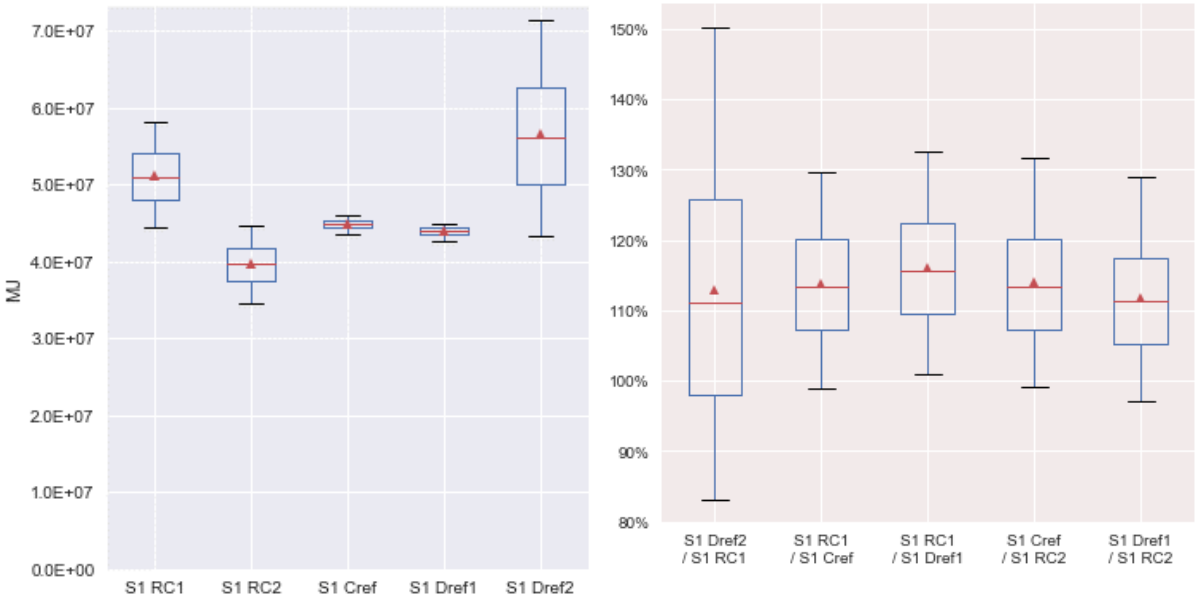


Figure 7-5 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On observe une plage d'incertitude assez étendue pour les systèmes à base de pompe à chaleur, en particulier pour le système à base de PAC air/eau par bâtiments. SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est l'élément le plus contributeur de ces systèmes.

La figure de droite présente la valeur des ratios entre les impacts de différents systèmes. On peut faire les observations suivantes :

- Dans un peu plus de 25% des simulations, le système S1-Dref2 a des impacts inférieurs à ceux du système S1-RC1. Pour tous les autres systèmes, le ratio passe en dessous de 100 % dans environ de 5 % des cas ou moins.
- Pour tous les écarts qui ont été calculés sur cette figure, le ratio entre les 2 systèmes est supérieur à 110 % pour la majorité des simulations (plus de 50 % mais moins de 75 %). Ces écarts ne sont donc pas particulièrement nets entre ces systèmes.

Le classement établi au § 5.2.3.4 reste donc valable dans une majorité des simulations. Cependant, dans de nombreux cas, les écarts observés entre deux systèmes respectent plus le critère établi de 10% d'écart minimum.

7.2.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources minérales et métalliques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

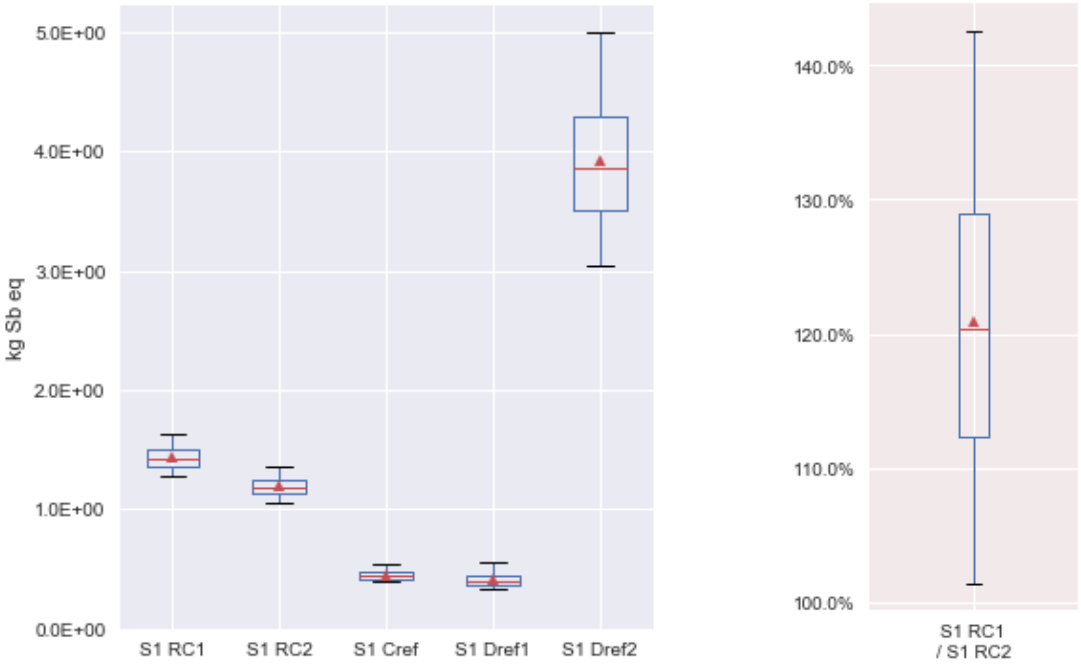


Figure 7-6 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratio des impacts entre S1-RC1 et S1-RC2 (droite)

L'incertitude obtenue par calcul sur cet indicateur est relativement faible pour la plupart des systèmes comparés. Cependant, les impacts pour cet indicateur sont principalement liés à l'utilisation des matériaux qui composent les systèmes, et l'incertitude de la composition matière des systèmes a été modélisée de manière très simplifiée : seule la durée de vie des équipements a été considérée incertaine, pas les masses de chaque composants (voir § 7.1.1). L'incertitude obtenue est donc très probablement sous-estimée.

En prenant en compte le critère de 50% d'écart nécessaire pour départager deux systèmes, on peut faire les observations suivantes :

- Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système à base de PAC air/eau par bâtiment (S1-Dref2) a un impact significativement plus élevé que les autres.
- Les systèmes à base de chaudières gaz (S1-Cref et S1-Dref1) sont les moins ceux qui ont causent le moins d'impact sur cet indicateur et ont une performance globalement équivalente.
- Les systèmes à base de PAC centralisés (S1-RC1 et S1-RC2) se situent entre les deux. Les écarts entre les deux systèmes ne sont pas suffisamment significatifs pour pouvoir conclure sans une analyse plus fine au niveau des flux élémentaires qui n'a pas été réalisée dans cette étude.

Le classement global entre les systèmes étudiés et les systèmes de référence n'est donc pas remis en cause par cette analyse.

7.3 Cas d'étude 2

Rappel des configurations des scénarios :

- S2-RC : réseau de chaleur et réseau de froid alimentés par un système de thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique ;
- S2-Cref :
  - réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz ;
  - réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression ;
- S2-Dref1 :
  - chaudières gaz par bâtiment ;
  - groupe froid à compression par bâtiment ;
- S2-Dref2 : thermo-frigo-pompe par bâtiment.

7.3.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « changement climatique ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

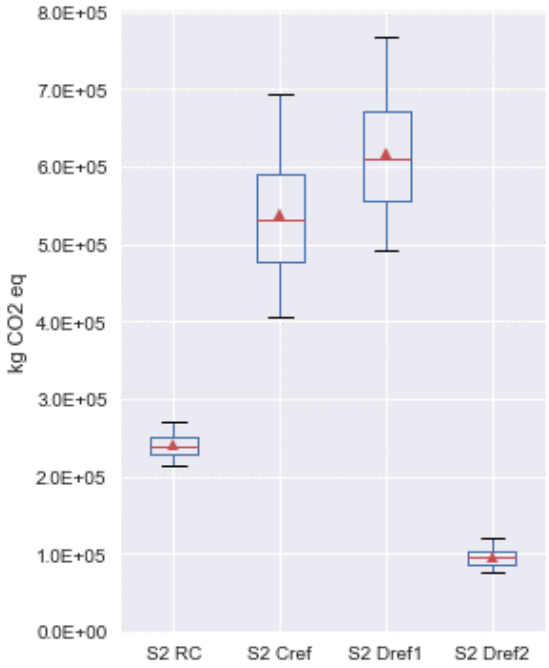


Figure 7-7 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de chaudières à gaz, centralisées (S2-Cref) et décentralisées (S2-Dref1). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la combustion ou l'approvisionnement en gaz naturel, qui sont les principales contributrices aux impacts de ces systèmes.

L'incertitude sur les systèmes à base de TFP est plus faible, mais ces résultats ont été calculés à mix électrique constant (voir § 7.1.1).

Les systèmes à base réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz / réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression (S2-Cref) et chaudières gaz / groupe froid à compression par bâtiment (S2-Dref1) restent les systèmes les plus impactants.

Le classement global entre les systèmes étudiés et les systèmes de référence n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.3.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « acidification terrestre et eau douce ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau II selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle est d'un niveau de robustesse scientifique satisfaisant, mais qu'elle peut être améliorée pour représenter plus fidèlement ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 30% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

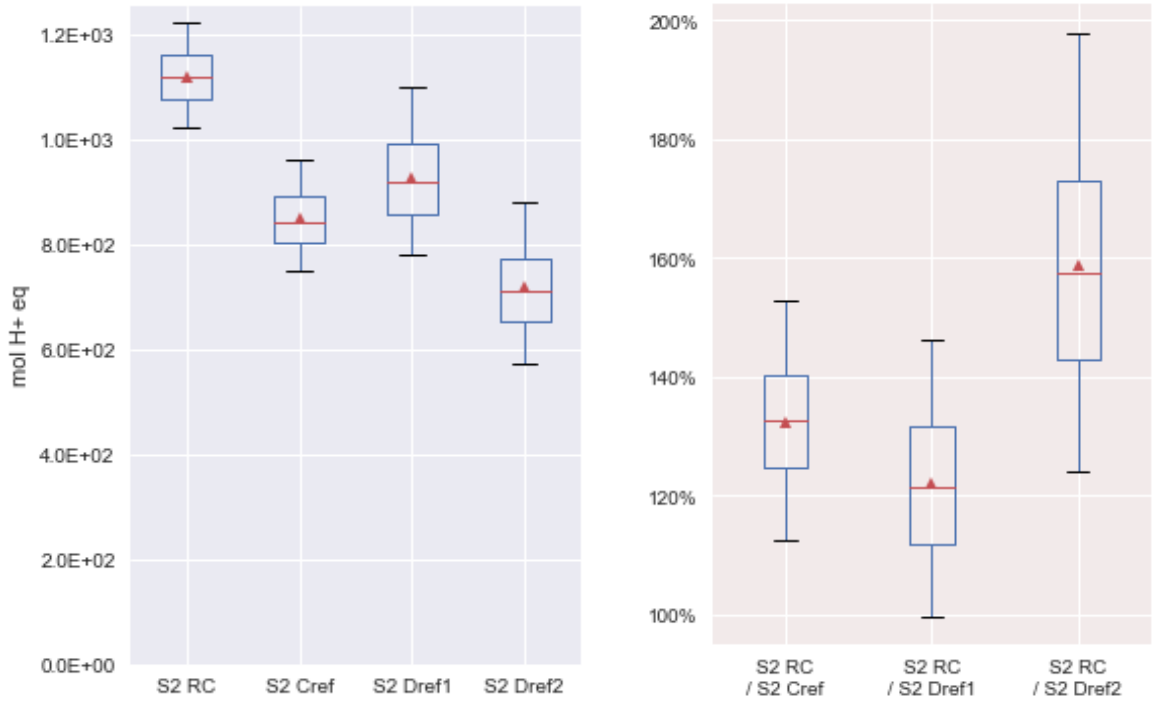


Figure 7-8 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

L'incertitude obtenue par calcul sur cet indicateur est relativement importante pour la plupart des systèmes comparés. SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité, de gaz (phase amont) et de matériaux utilisés dans la production des réseaux qui sont les éléments les plus contributeurs.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système à base de réseau de chaleur et réseau de froid alimentés par un système de thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique (S2-RC) a un impact plus élevé que les trois autres. Sur la figure de droite, on peut faire les observations suivantes :

- Le système S2-RC a un impact supérieur à celui du système S2-Cref (réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz / réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression) pour toutes les simulations, et le critère de 30 % d'écart minimal est respecté dans un peu plus de 50 % des simulations.
- Le système S2-RC a un impact supérieur à celui du système S1-Dref1 (chaudières gaz / groupe froid à compression par bâtiment) dans plus de 95 % des simulations, mais le critère des 30 % d'écart minimal entre ces deux systèmes pour pouvoir les départager n'est respecté que pour moins de 25 % des simulations.

- Le système S2-RC a un impact supérieur à celui du système S1-Dref2 (thermo-frigo-pompe par bâtiment) pour toutes les simulations et le critère de 30 % d'écart minimal est respecté pour environ 90 % des simulations.

La conclusion principale n'est cependant pas remise en cause par cette analyse : le système étudié (S2-RC) a des impacts plus élevés en matière d'acidification que les systèmes de référence auxquels il est comparé.

7.3.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Particules fines ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

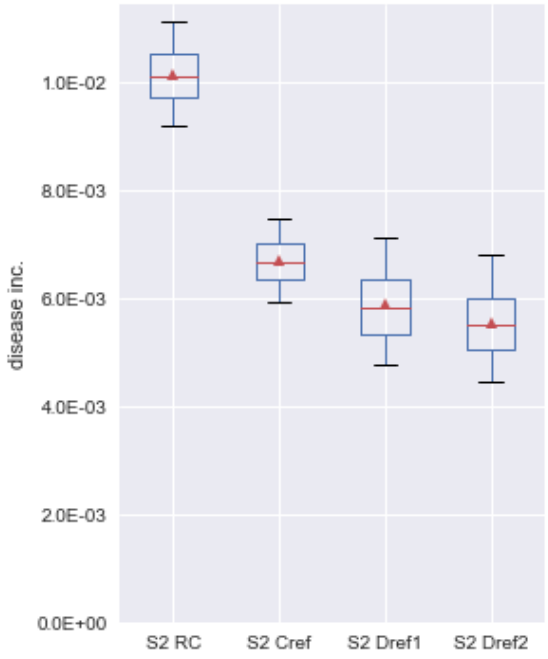


Figure 7-9 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système

On observe une plage d'incertitude assez étendue pour tous les systèmes. SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité, de gaz (phase amont) et de matériaux utilisés dans la production des réseaux qui sont les éléments les plus contributeurs.

Le système à base de réseau de chaleur et réseau de froid alimentés par un système de thermo-frigo-pompe sur nappe phréatique (S2-RC) reste le plus impactant de tous les systèmes.

Le classement global entre le système étudié et les systèmes de référence n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.3.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources énergétiques ». Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

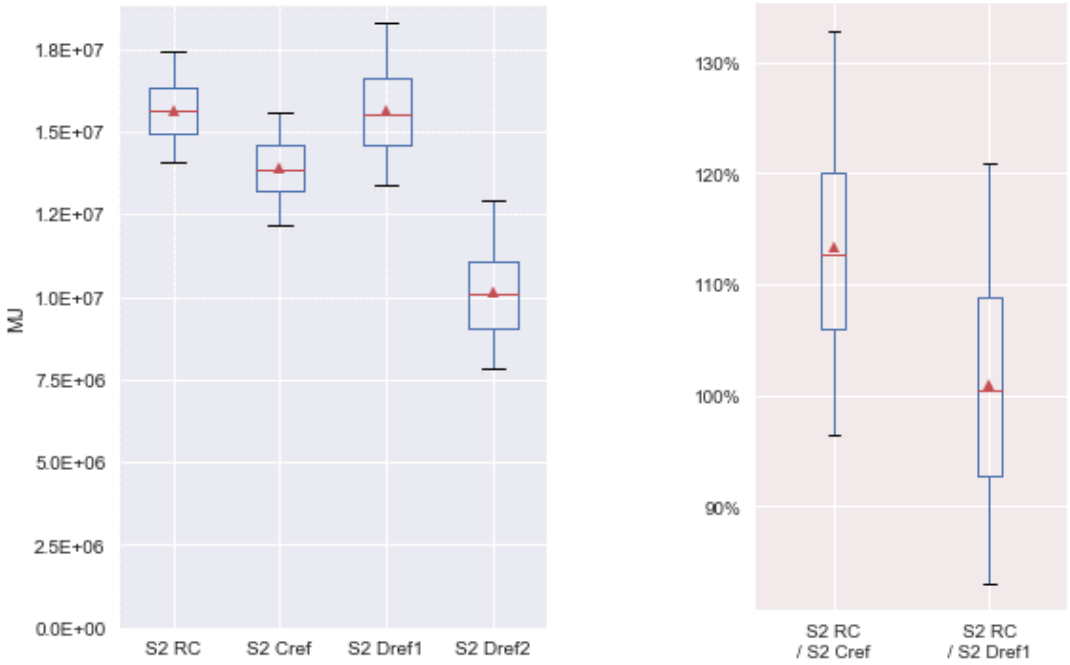


Figure 7-10 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On observe une plage d'incertitude assez étendue pour tous les systèmes. SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité et de gaz (phase amont)., qui sont les principales contributrices aux impacts de ces systèmes.

Deux systèmes ont ici des plages d'incertitude qui se chevauchent. L'analyse de la figure de droite permet de faire les observations suivantes :

- Le système S2-RC (réseaux de chaleur urbains alimentés par des TFP) consomme davantage de ressources énergétiques non-renouvelables que le système S2-Cref (réseau de chaleur alimenté par une chaufferie gaz / réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression) dans plus de 85 % des simulations, et le seuil de 10% d'écart est dépassé dans plus de 60 % des simulations.
- La consommation des systèmes S2-RC et S2-Dref1 sont globalement équivalente, avec un ratio dont la médiane est proche de 100 %. Il est donc préférable de considérer qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus pour ces deux systèmes sur cet indicateur.

7.3.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources minérales et métalliques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

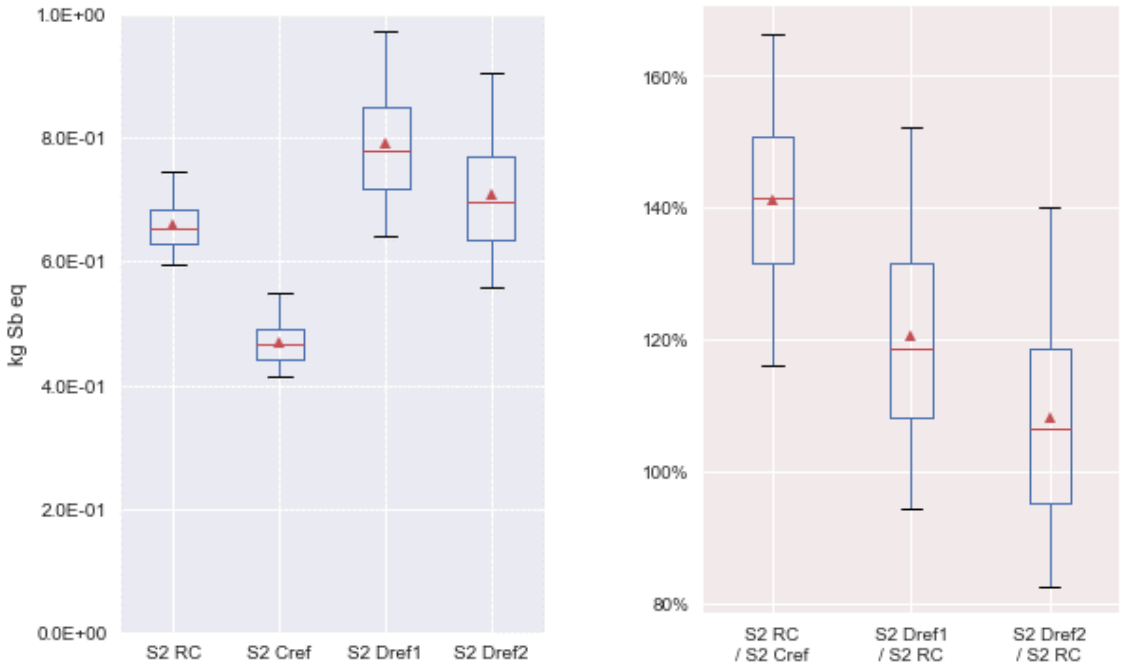


Figure 7-11 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

L'incertitude obtenue par calcul sur cet indicateur est relativement importante pour la plupart des systèmes comparés, en particulier sur les systèmes décentralisés. Cependant, les impacts pour cet indicateur sont principalement liés à l'utilisation des matériaux qui composent les systèmes, et l'incertitude dans ces paramètres a été modélisée de manière très simpliste (cf. § 7.1.1). L'incertitude obtenue est donc très probablement largement sous-estimée.

Plusieurs systèmes ont des plages d'incertitude qui se chevauchent. L'étude visant à comparer le système étudié (S2-RC) aux autres systèmes de référence, la figure de droite présente uniquement l'incertitude dans le ratio entre les impacts du système S2-RC et les trois autres. En analysant cette figure, on peut faire les observations suivantes :

- Le système S2-RC a des impacts supérieurs à ceux du système S2-Cref dans toutes les simulations, mais le critère de 50 % d'écart pour pouvoir les départager n'est respecté que dans moins de 25 % des simulations.
- Le système S2-RC a des impacts inférieurs à ceux du système S2-Dref1 dans plus de 80 % des simulations, mais le critère de 50 % d'écart minimal pour pouvoir les départager n'est respecté que dans environ 5 % des simulations.
- Le système S2-RC a des impacts inférieurs à ceux du système S2-Dref2 dans environ 65 % des simulations. Dans les autres 35 % de simulations, c'est l'inverse. Le critère de 50 % d'écart minimal n'est respecté dans aucune de ces simulations. Ces deux systèmes doivent donc être considérés comme équivalents.

Compte-tenu de cette analyse d'incertitude, il est préférable de considérer que tous ces systèmes ont une performance équivalente sur cette indicateur.

7.4 Cas d'étude 3

Rappel des configurations des scénarios :

- S3-RC : réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique ;
- S3-Cref : réseau de froid alimenté par un groupe froid à compression aérothermie ;
- S3-Dref : groupe froid aérothermique par bâtiment.

7.4.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « changement climatique ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

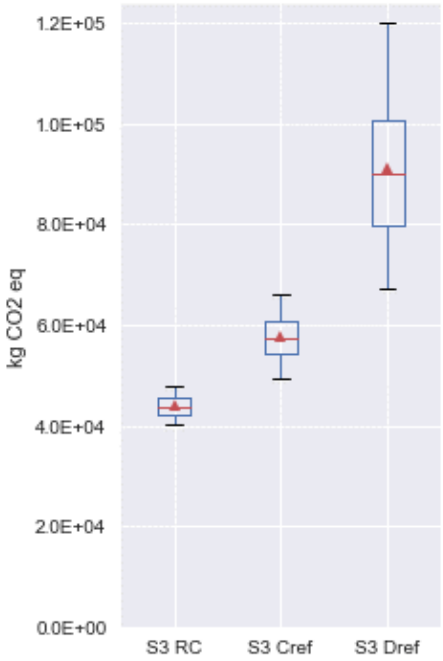


Figure 7-12 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation électrique, qui est la principale contributrice aux impacts de ces systèmes.

L'incertitude sur les systèmes à base de groupe froid centralisé est plus faible. Pour rappel, l'incertitude dans le mix électrique n'a pas été prise en compte dans ces calculs, ce qui sous-estime probablement les plages de variations.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S3-Dref a un impact significativement plus élevé que les autres et que le scénario à base de réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique (S3-RC) est le moins impactant.

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.4.2 Toxicité humaine, effets non-cancérogènes

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « toxicité humaine, effets non cancérogènes ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

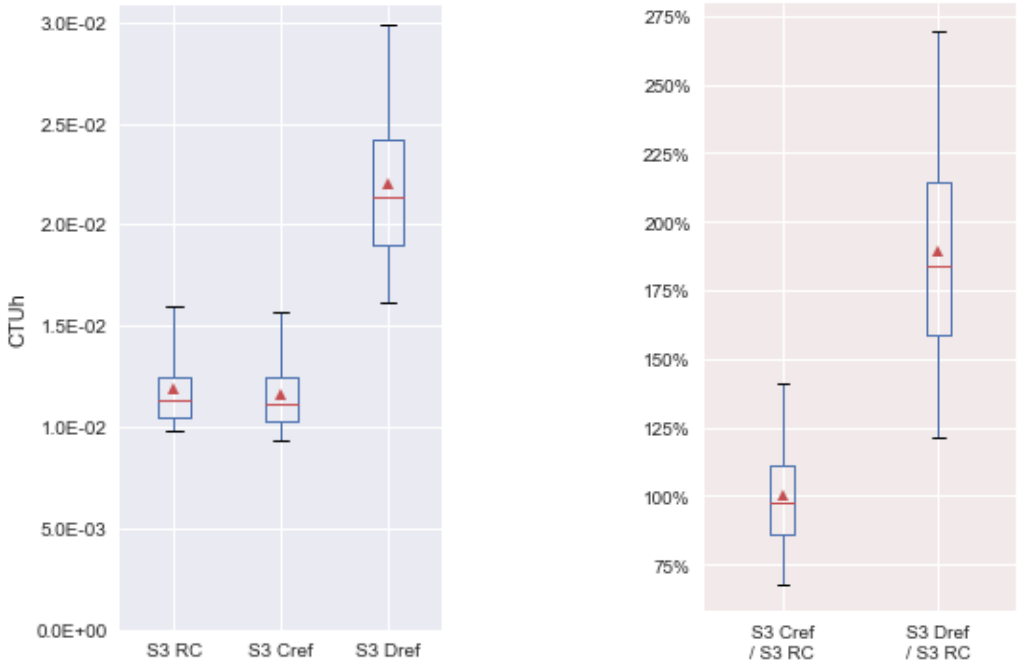


Figure 7-13 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Toxicité humaine, effets non-cancérogènes : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

En valeur absolue, on note que l'incertitude pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref) est supérieure aux autres, mais c'est aussi le système qui a l'impact le plus élevé sur cet indicateur. En valeur relative, les niveaux d'incertitude sont globalement du même ordre de grandeur : pour 50% des simulations, les impacts sont compris dans une fourchette autour de l'ordre de ±10% de la valeur médiane (±8% pour S3-Cref, ±11% pour S3-RC et ±12% pour S3-Dref). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

En analysant la figure de droite, on peut faire les observations suivantes :

- Les systèmes S3-RC et S3-Cref ont des impacts très proches sur cet indicateur. Ils doivent être considérés comme équivalents.
- Le système S3-RC (réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique) a des impacts plus faibles que ceux du système S3-Dref dans toutes les simulations, et l'écart entre ces deux systèmes est supérieur à 50 % dans plus de 75 % des simulations.

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.4.3 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « acidification terrestre et eau douce ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau II selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle est d'un niveau de robustesse scientifique satisfaisant, mais

qu'elle peut être améliorée pour représenter plus fidèlement ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 30% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

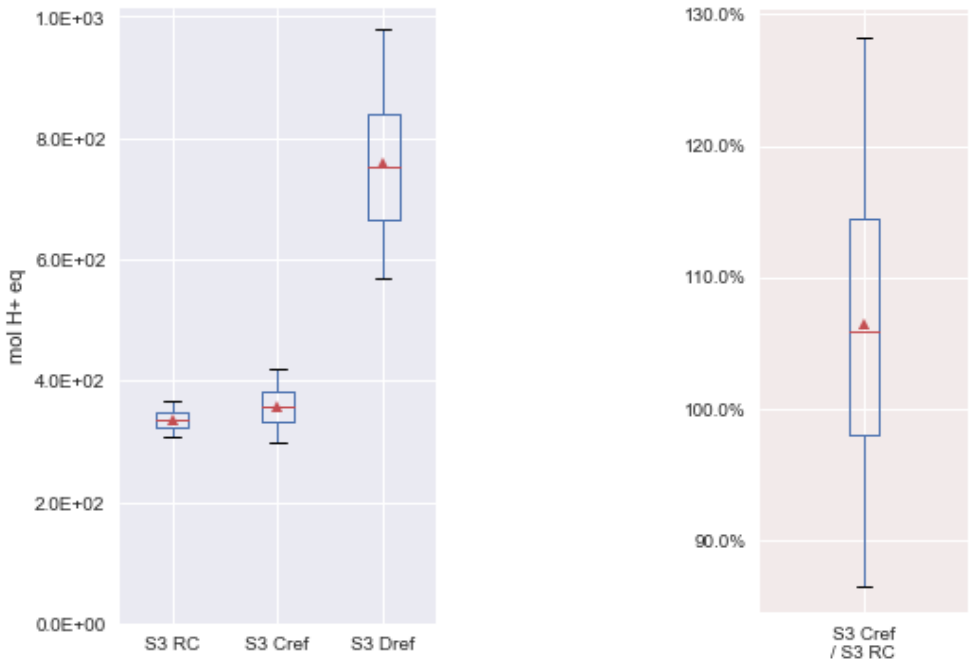


Figure 7-14 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S3-Dref a un impact significativement plus élevé que les autres et que le scénario à base de réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique (S3-RC) est le moins impactant.

En analysant la figure de droite, on peut observer que pour un peu plus de 25 % des simulations, le système S3-RC a des impacts supérieurs à ceux du système S3-Cref. C'est l'inverse pour 75 % des simulations. Cependant, le critère de 30 % d'écart minimal pour pouvoir départager les deux systèmes n'est respecté pour aucune simulation. Ces deux systèmes doivent donc être considérés comme équivalents sur cet indicateur.

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.4.4 Particules fines

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Particules fines ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

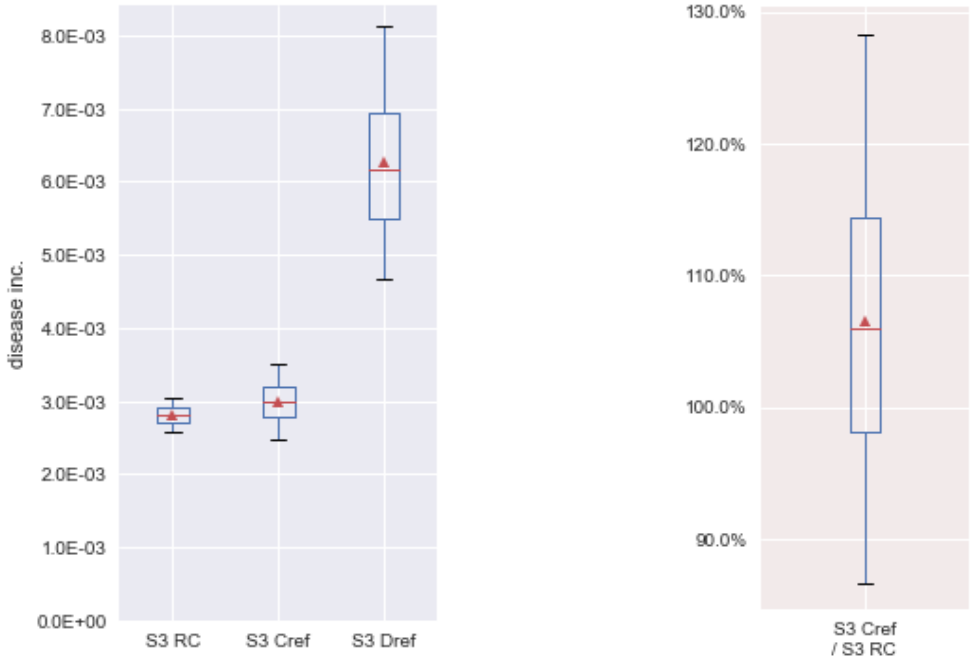


Figure 7-15 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref). SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S3-Dref a un impact significativement plus élevé que les autres. Les systèmes S3-RC et S3-Cref ont des impacts très proches sur cet indicateur :

- Pour environ 70 % des simulations, c'est le système S3-Cref qui a les impacts les plus élevés. Cependant, l'écart est supérieur à 10 % uniquement pour environ 35 % des simulations.
- A l'inverse, pour environ 30 % des simulation, c'est le système S3-RC qui a les impacts les plus élevés, avec un écart supérieur à 10 % pour moins de 10 % des simulations.

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.4.5 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources énergétiques ». Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

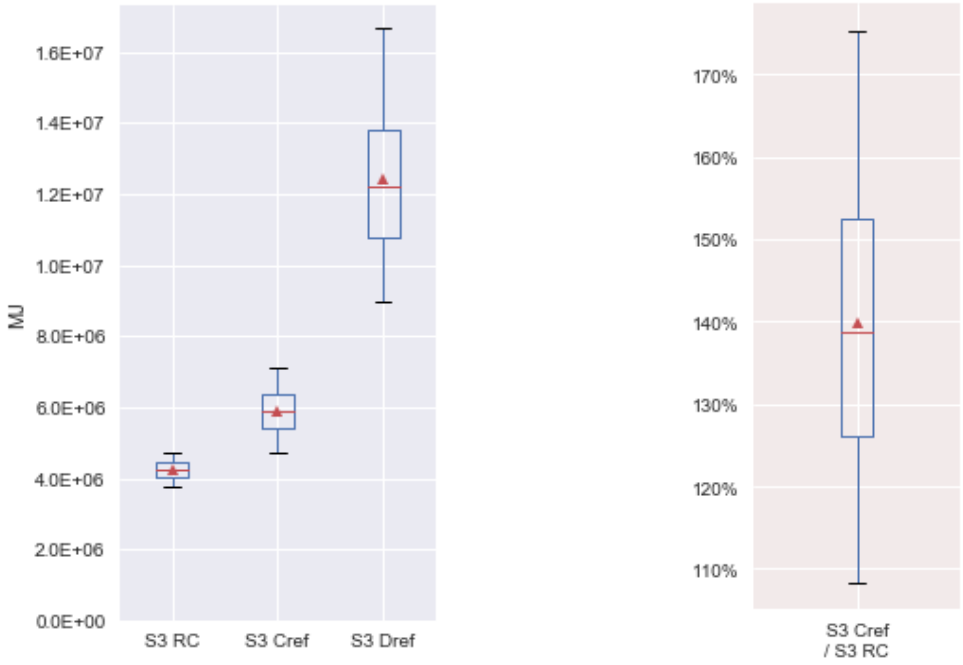


Figure 7-16 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref). SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S3-Dref a un impact significativement plus élevé que les autres et que le scénario à base de réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique (S3-RC) est le moins impactant.

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.4.6 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources minérales et métalliques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

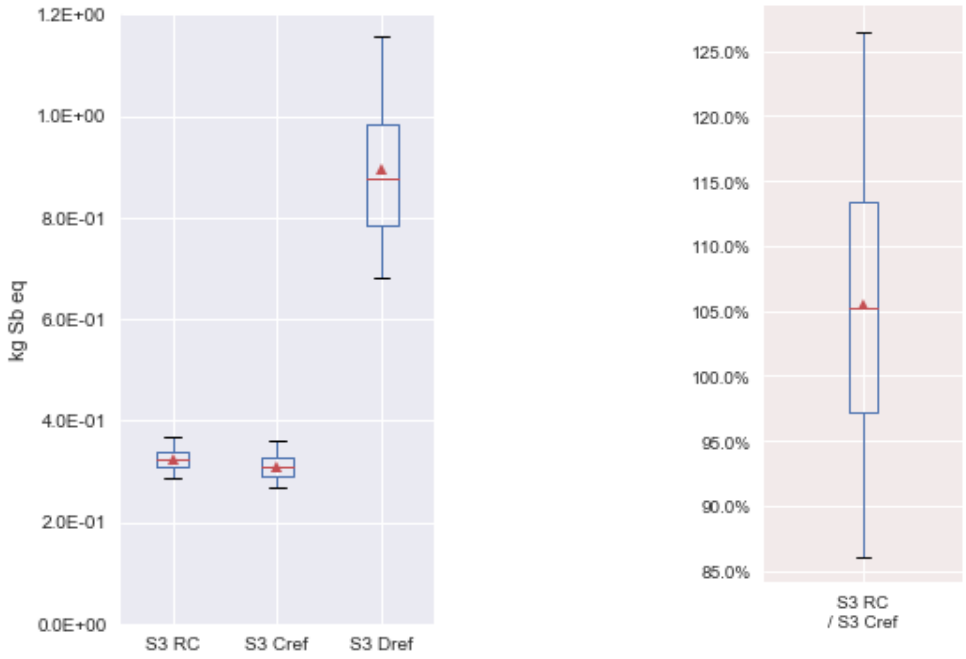


Figure 7-17 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de groupe froid aérothermique par bâtiment (S3-Dref). Cependant, les impacts pour cet indicateur sont principalement liés à l'utilisation des matériaux qui composent les systèmes, et aucun profil de distribution n'a été défini pour ces paramètres. L'incertitude obtenue est donc très probablement largement sous-estimée.

On peut faire les observations suivantes :

- Malgré une incertitude relativement élevée, le système S3-Dref a un impact significativement plus élevé que les autres, y compris en considérant un écart de 50 % pour pouvoir départager deux systèmes ;
- Le scénario à base de réseau de froid alimenté par un groupe froid à absorption ammoniac/eau sur nappe phréatique (S3-RC) a les impacts les plus faibles dans la majorité des simulations (environ 65 %), mais les écarts par rapport au système centralisé de référence (S3-Cref) sont trop faibles pour pouvoir conclure à une réelle supériorité d'un système par rapport à l'autre sur cet indicateur.

7.5 Cas d'étude 6

Voici un rappel des configurations des scénarios de l'étude de cas 6 :

- Système S6-R : Pompe à chaleur fonctionnant à l'ammoniac sur nappe phréatique ;
- Système S6-Cref : Chaudière gaz à condensation.

7.5.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « changement climatique ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart

minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

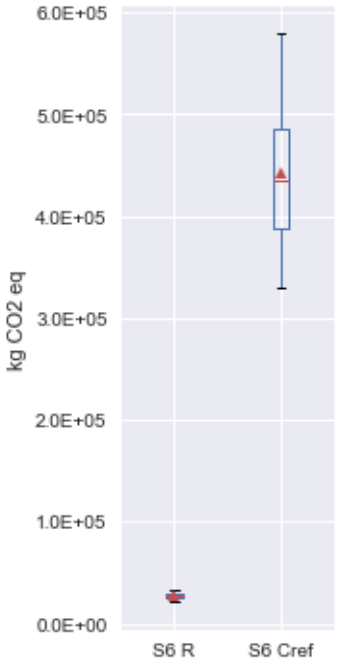


Figure 7-18 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de chaudières gaz à condensation (S6-Cref). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la combustion ou l'approvisionnement en gaz naturel, qui sont les principales contributrices aux impacts de ces systèmes.

L'incertitude sur le système à base de PAC est plus faible, mais ces résultats ont été calculés à mix électrique constant.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S6-Cref a un impact significativement plus élevé que le scénario à base de PAC fonctionnant à l'ammoniac sur nappe phréatique (S6-R).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.5.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « acidification terrestre et eau douce ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau II selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle est d'un niveau de robustesse scientifique satisfaisant, mais qu'elle peut être améliorée pour représenter plus fidèlement ce mécanisme environnemental. Nous

avons supposé qu'un écart minimal de 30% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

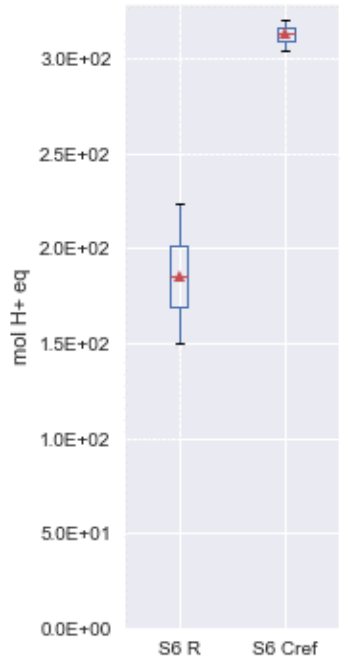


Figure 7-19 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC (S6-R). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S6-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus faible que le scénario à base de chaudières gaz à condensation (S6-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.5.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Particules fines ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

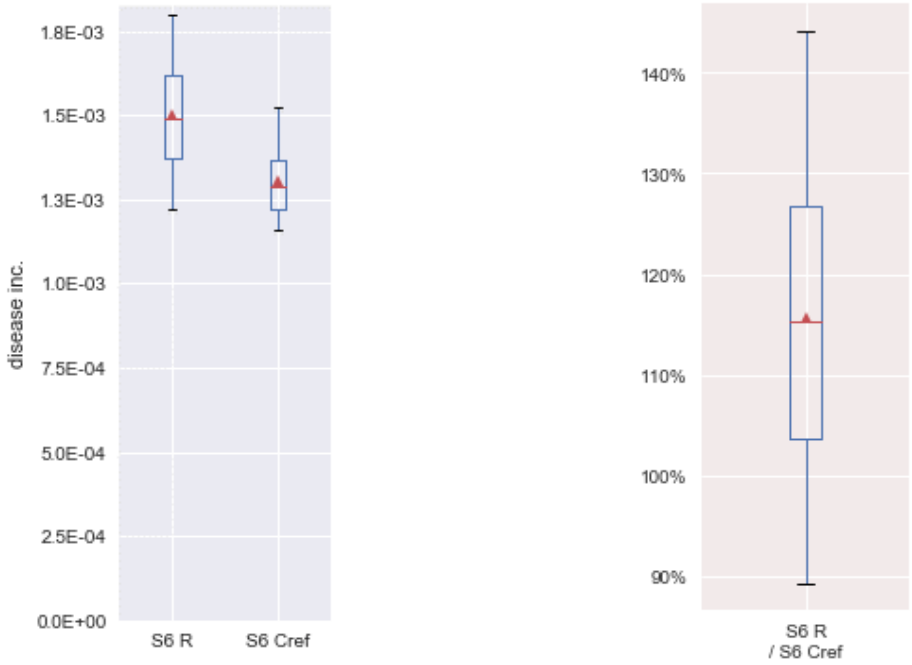


Figure 7-20 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts (droite)

On note une incertitude importante pour les deux systèmes de ce cas d'étude. SimaPro ne permettant pas de faire d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'identifier la cause de cette incertitude plus élevée. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité, la combustion ou l'approvisionnement en gaz naturel qui sont les principales contributrices à l'impact des systèmes.

Les deux systèmes ont ici leurs plages d'incertitude qui se chevauchent. En analysant la figure de droite, on peut constater que dans la majorité de simulations, le système S6-R (PAC fonctionnant à l'ammoniac sur nappe phréatique) a un impact supérieur à celui du système S6-Cref (chaudière gaz à condensation). Cependant, dans un peu moins de 25% des simulations, ce n'est pas le cas. En considérant un critère d'écart de 10 % pour pouvoir départager les deux systèmes, le système S6-R a des impacts significativement supérieurs à ceux de S6-Cref dans environ 65 % des simulations.

7.5.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources énergétiques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

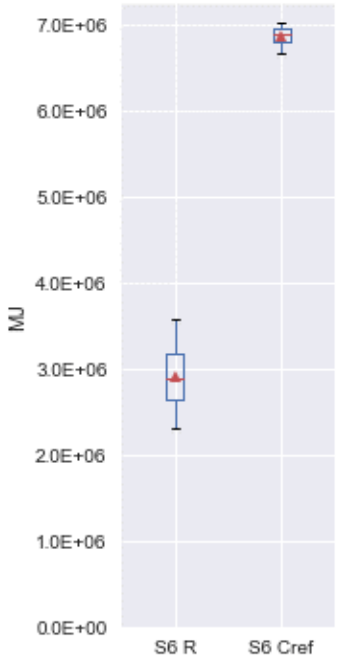


Figure 7-21 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC (S6-R). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S6-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus faible que le scénario à base de chaudières gaz à condensation (S6-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.5.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources minérales et métalliques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

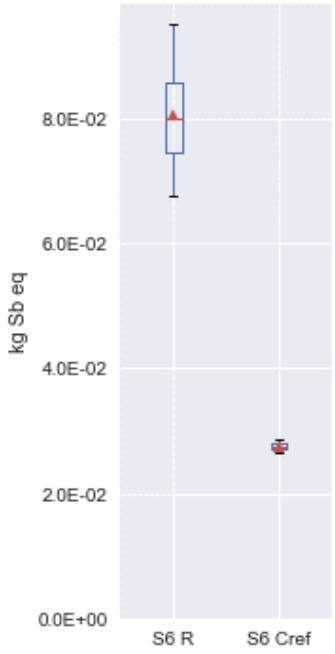


Figure 7-22 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC (S6-R). Cependant, les impacts pour cet indicateur sont principalement liés à l'utilisation des matériaux qui composent les systèmes, et aucun profil de distribution n'a été défini pour ces paramètres. L'incertitude obtenue est donc très probablement largement sous-estimée.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S6-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus important que le scénario à base de chaudières gaz à condensation (S6-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.6 Cas d'étude 7

Voici un rappel des configurations des scénarios de l'étude de cas 7 :

- Système S7-R : Pompe à chaleur hybride (cycle absorption ammoniac/eau et cycle compression à l'ammoniac) utilisant de la chaleur fatale ;
- Système S7-Cref : Chaudière gaz de 1.7 MW.

7.6.1 Changement climatique

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « changement climatique ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

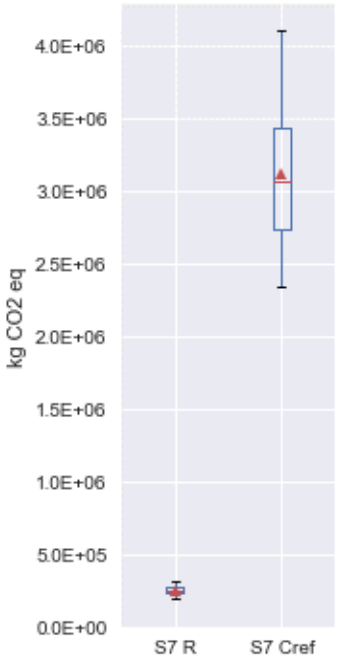


Figure 7-23 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour les systèmes à base de chaudières gaz (S7-Cref). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la combustion ou l'approvisionnement en gaz naturel, qui sont les principales contributrices aux impacts de ces systèmes.

L'incertitude sur le système à base de PAC est plus faible, mais ces résultats ont été calculés à mix électrique constant.

Malgré une incertitude relativement élevée, on peut constater que le système S7-Cref a un impact significativement plus élevé que le scénario à base de PAC hybride utilisant de la chaleur fatale (S7-R).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.6.2 Acidification terrestre et eau douce

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « acidification terrestre et eau douce ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau II selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle est d'un niveau de robustesse scientifique satisfaisant, mais qu'elle peut être améliorée pour représenter plus fidèlement ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 30% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

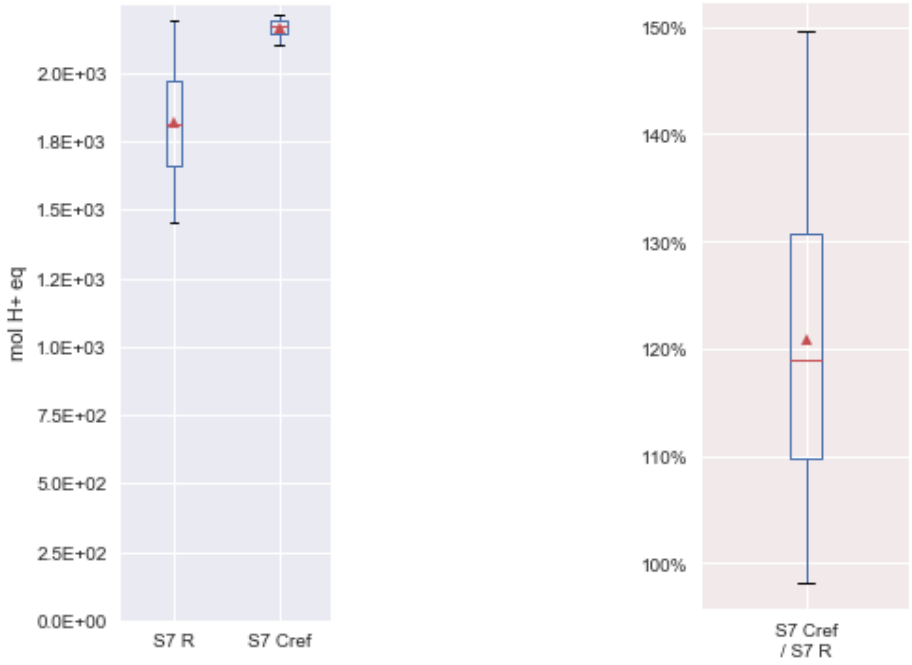


Figure 7-24 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts (droite)

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC hybride utilisant de la chaleur fatale (S7-R). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

En analysant la figure de droite, on peut observer que le système S7-R à ceux du système à base de chaudières gaz (S7-Cref) dans la très grande majorité des cas (environ 90 %). Cependant, le critère de 30 % d'écart minimum n'est respecté que pour environ 25 % des simulations. L'avantage n'est donc pas net et il est préférable de considérer que ces deux systèmes ont une performance équivalente sur cet indicateur.

7.6.3 Particules fines

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Particules fines ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau I selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle a un bon niveau de robustesse scientifique. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 10% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

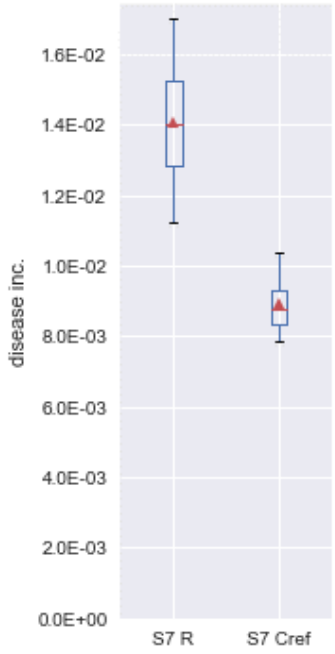


Figure 7-25 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC hybride utilisant de la chaleur fatale (S7-R). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S7-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus important que le scénario à base de chaudières gaz (S7-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.6.4 Ressources énergétiques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources énergétiques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

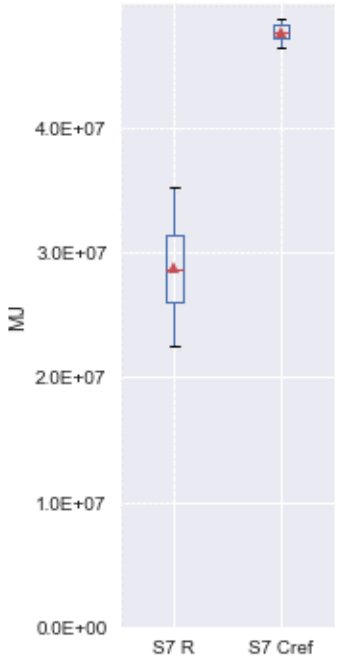


Figure 7-26 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC hybride utilisant de la chaleur fatale (S7-R). SimaPro ne permettant pas de réaliser d'analyse de sensibilité globale, il n'est pas possible d'expliquer l'origine de cette incertitude plus importante. Elle est probablement due aux données ecoinvent utilisées pour la consommation d'électricité qui est la principale contributrice à l'impact du système.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S7-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus faible que le scénario à base de chaudières gaz (S7-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

7.6.5 Ressources minérales et métalliques

La figure ci-dessous présente les distributions obtenues pour l'indicateur « Ressources minérales et métalliques ». La méthode de caractérisation utilisée pour cet indicateur est classée niveau III selon le référentiel ILCD, ce qui signifie qu'elle pas pleinement satisfaisante mais qu'elle correspond à l'état de l'art actuel de la connaissance de ce mécanisme environnemental. Nous avons supposé qu'un écart minimal de 50% était nécessaire pour pouvoir départager deux systèmes sur cet indicateur (voir § 5.1.1.3).

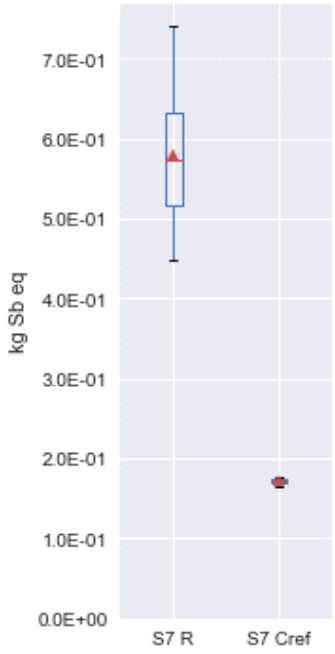


Figure 7-27 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système

On note une incertitude importante pour le système à base de PAC hybride utilisant de la chaleur fatale (S7-R). Cependant, les impacts pour cet indicateur sont principalement liés à l'utilisation des matériaux qui composent les systèmes, et aucun profil de distribution n'a été défini pour ces paramètres. L'incertitude obtenue est donc très probablement largement sous-estimée.

Malgré une incertitude relativement élevée pour le S7-R, on peut constater que ce système a un impact significativement plus important que le scénario à base de chaudières gaz (S7-Cref).

Le classement global des différents systèmes n'est pas remis en cause par cette analyse.

8 Conclusions générales

Cette étude a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux de plusieurs systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid, de puissance supérieure à 250 kW via la méthode d'analyse du cycle de vie. Les systèmes étudiés sont basés sur des pompes à chaleur géothermiques ou des installations solaires thermiques. L'évaluation vise deux objectifs principaux :

- Comparer les impacts environnementaux des systèmes étudiés à ceux de plusieurs autres systèmes de référence ;
- Identifier les principales sources d'impacts environnementaux au cours de leur cycle de vie.

L'étude comprend onze cas d'études, représentatifs de différents contextes d'utilisation des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance :

- 5 cas d'étude couvrent des usages de réseaux urbains (cas 1 à 4 et cas 11)
- 6 cas d'étude couvrent des usages industriels (cas 5 à 10)

8.1 Synthèse des principaux résultats

Cette partie présente les conclusions principales pour chacun des cas d'étude, sous la forme de fiches synthétiques, toutes organisées de la même façon :

- La section « Hypothèses générales » rappelle le besoin à couvrir et l'énergie fournie, qui sont les deux éléments clés de l'unité fonctionnelle commune à tous les systèmes comparés, ainsi que les caractéristiques principales de chacun de ces systèmes.
- La section « Source des dommages environnementaux » rappelle les catégories d'impacts qui ont été identifiés comme les plus contributrices aux dommages environnementaux et qui ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée.
- La section « Analyse de sensibilité réalisées » présente les paramètres dont les valeurs ont été modifiées pour vérifier la robustesse des conclusions obtenues.
- La section « Comparaison des systèmes» est composé de deux parties :
    - Un tableau donne le classement obtenu sur chaque indicateur pertinent, ainsi que les analyses de sensibilités pour lesquelles ce classement est modifié. Le classement est présenté sous forme de liste, avec en premier le système qui présente l'impact environnemental le plus faible. Le signe « ~ » est utilisé pour indiquer que deux systèmes ont un impact environnemental équivalent. Ce classement intègre à la fois l'analyse réalisée dans le paragraphe 5, et l'analyse d'incertitude réalisée au § 7 pour les cas d'étude où cette analyse a été réalisée.
    - Un paragraphe détaille des conclusions plus générales sur l'intérêt du système étudié par rapport aux autres systèmes auxquels il a été comparé, en analysant les dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, ainsi que la contribution à l'épuisement de ressources naturelles.
- Les deux dernières sections présentent des recommandations générales aux maîtres d'ouvrages (gestionnaires de réseaux urbains et industriels), ainsi qu'aux fabricants des systèmes étudiés, pour améliorer la performance environnementale de ces systèmes.

8.1.1 Cas d'étude 1

Hypothèses générales :

Besoin Chauffage de 50 bâtiments en zone H2b : 50 x 100 kW, dont 4 MW de logements neufs et 1 MW de bureaux neufs.

Energie à fournir 10,2 GWh de chaleur, secondaire de chaque sous-station à 50/40°C

Systèmes	Principal	Appoint / Secours
S1-RC1	PAC (2 x 0,85 MW) sur capteurs géothermiques (1,1 MW) : 80 % du besoin	Chaudières gaz (2 x 2,625 MW) : 20 % du besoin
S1-RC2	PAC (2 x 0,85 MW) sur nappe phréatique (1,3 MW) : 83 % du besoin	Chaudière gaz (2 x 2,625 MW) : 17 % du besoin
S1-Cref	Chaufferie gaz : 3 x 1,75 MW	Chaudière gaz 1,75 MW
S1-Dref1	Chaudières gaz : 50 x 100 kW	Aucun
S1-Dref2	PAC Air/eau : 50 x 100 kW	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (30 à 90%) Particules fines (9 à 36%) Autres (cumul de 2 à 14%)	Changement climatique (46 à 94%) Acidification terrestre (3 à 19%) Autres (cumul de 3 à 35%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Température de l'eau approvisionnée ;
- Prise en compte de la conductivité du sol pour deux cas extrêmes
- Nature du réfrigérant (uniquement pour S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2)

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S1-Dref2 2. S1-RC2 3. S1-RC1 4. S1-Cref 5. S1-Dref1	Mix électrique : Différences entre S1-Dref2 et S1-RC2 non significatives avec le mix Usage Chauffage Avec changement de réfrigérant : S1-Dref2 et S1-RC2 sont équivalents Autres cas évalués : pas de modification du classement
Particules fines	1. S1-Dref1 2. S1-Cref 3. S1-RC2 4. S1-Dref2 ~ S1-RC1	Température de l'eau : S1-Dref2 moins performant que S1-RC1 si boucle 60°C/50°C Autres cas évalués : pas de modification du classement
Acidification terrestre et eau douce	1. S1-Dref1 ~ S1-Cref 2. S1-RC2 3. S1-RC1 ~ S1-Dref2	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S1-RC2 2. S1-Dref1 ~ S1-Cref 3. S1-RC1 ~S1-Dref2	Avec le mix ADEME 2050 : S1-Cref et S1-Dref1 deviennent les moins performants. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources minérales et métalliques	1. S1-Cref ~S1-Dref1 2. S1-RC1 ~ S1-RC2 3. S1-Dref2	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Les systèmes à base de PAC (S1-RC1, S1-RC2 et S1-Dref2) causent moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes que les systèmes à base de chaufferies gaz (S1-Cref et S1-Dref1). Pour l'épuisement des ressources énergétiques, ces systèmes n'apportent pas de bénéfices actuellement par rapport aux chaudières gaz, mais un mix électrique avec davantage de renouvelables, comme le

mix ADEME 2050 modifie cette conclusion. En matière de ressources minérales et métalliques, les chaudières gaz ont par contre l'avantage.

En ce qui concerne les chaufferies gaz, un système centralisé est préférable à un système décentralisé : le rendement énergétique supérieur compense en général les impacts supplémentaires (pertes thermiques du réseaux, construction d'infrastructures plus importantes, consommation électrique des pompes)

Pour les systèmes à base de PAC, le taux de couverture du besoin par les PAC est à maximiser :

- L'empreinte carbone des systèmes S1-RC1 et S1-RC2 est principalement due à l'appoint gaz. Le système S1-Dref2 a une meilleure performance carbone uniquement parce que 100% du besoin de chaleur est couvert par les PAC air/eau.
- Si on considère l'ensemble des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, les conclusions restent les mêmes, mais les écarts entre PAC centralisées et décentralisées sont plus faibles.

Le scénario PAC sur sondes géothermiques (S1-RC1) a des impacts majoritairement supérieurs, ou égaux, à ceux du scénario PAC sur aquifère (S1-RC2) : S1-RC2 a COP supérieur d'où moindre recours à l'appoint gaz. S1-RC1 nécessite l'utilisation de propylène glycol, pour éviter le gel de fluide caloporteur qui circule dans les sondes.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

Plus le recours à de l'appoint au gaz naturel sera limité, plus la performance carbone du système sera élevée. Dans la mesure du possible, il est donc préférable d'aller au-delà des 65% de couverture exigés pour être éligible au Fond Chaleur.

Le génie civil contribue de manière non-négligeable aux impacts de ces systèmes pour certains indicateurs. Les quantités de béton et d'acier sont donc à réduire dans la mesure du possible.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les efforts réalisés pour utiliser des fluides frigorigènes avec un faible potentiel de réchauffement global ont permis de fortement réduire la contribution des pertes de fluide frigorigène. Dans l'étude, il a été fait l'hypothèse que les systèmes étudiés utilisaient du R1234ze. La contribution de ces fuites aux impacts du cycle de vie est maintenant quasiment négligeable

La recherche d'un COP maximal reste le principal levier d'action pour diminuer les impacts environnementaux de PAC de grande puissance.

La composition matière a une influence importante sur plusieurs indicateurs, notamment en ce qui concerne la toxicité humaine. La réduction des masses de métaux utilisées, voire le remplacement des métaux par des matériaux ayant des impacts de toxicité plus faible, devrait être étudié. Ce remplacement ne doit cependant pas se faire au détriment de la fiabilité ou de la durée de vie de l'équipement.

8.1.2 Cas d'étude 2

Hypothèses générales :

Besoin Chauffage et refroidissement de 20 bâtiments en zone H2b :
• Chauffage : 20 x 50 kW, dont 0,4 MW de logements neufs et 0,6 MW de bureaux neufs.
• Refroidissement : 20 x 50 kW (bureaux neufs uniquement).

Energie à fournir • Chauffage : 1,8 GWh de chaleur ; secondaire de chaque sous-station à 50/40°C
• Refroidissement : 2,4 GWh, secondaire de chaque sous-station à 7/12°C

Systèmes	Principal	Appoint / Secours
S2-RC	Thermo-frigo-pompe (0,27 MW) : 82 % du besoin chaud et 44 % du besoin froid	Chaudière gaz (3 x 350 kW) : 18 % du besoin chaud Groupe froid aérothermique (3 x 350 kW) : 56 % du besoin froid
S2-Cref	Chaufferie gaz : 2 x 525 kW Groupe froid aérothermie : 2 x 525 kW	Chaudière gaz 525 kW Groupe froid aérothermie 525 kW
S2-Dref1	Chaudière gaz : 20 x 50 kW Groupe froid air/eau : 20 x 50 kW	Aucun
S2-Dref2	Thermo-frigo-pompe : 20 x 50 KW	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (33 à 73%) Particules fines (16 à 36%) Autres (cumul 11 à 31%)	Changement climatique (50 à 85%) Acidification terrestre (6 à 19%) Autres (cumul 9 à 31%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur et de froid : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Température de l'eau approvisionnée ;
- Nature du réfrigérant : utilisation de R134-a à la place du R1234ze considéré

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S2-Dref2 2. S2-RC 3. S2-Cref 4. S2-Dref1	Avec changement de réfrigérant : • Plus de différences significatives entre S2-Dref2 et S2-RC • S2-Dref1 beaucoup moins performant que S2-Cref Autres cas évalués : pas de modification du classement
Particules fines	1. S2-Dref2 ~ S2-Dref1 2. S2-Cref 3. S2-RC	Avec le mix Usage « Clim » : • Plus de différences significatives entre S2-Cref et S2-RC Autres cas évalués : pas de modification du classement
Acidification terrestre et eau douce	1. S2-Dref2 ~ S2-Cref ~ S2-Dref1 2. S2-RC	Modification de la hiérarchie avec le mix Usage « Clim » : • S2-Dref2 ~ S2-RC, plus performant que S2-Cref ~ S2-Def1 Modification de la hiérarchie avec une boucle chaude en 60°C / 50°C : • S2-Dref2 ~ S2-Cref ~ S2-Dref1, plus performants que S2-RC Autres cas évalués : pas de modification du classement

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Ressources énergétiques	1. S2-Dref2 2. S2-Cref ~ S2-Dref1 ~ S2-RC	Modification de la hiérarchie avec le mix Usage Clim : • S2-Dref2 ~ S2-RC, plus performant que S2-Cref ~ S2-Def1 Modification de la hiérarchie avec le mix ADEME : • S2-Dref2 plus performant que S2-RC, plus performant que S2-Cref ~ S2-Dref1 Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources minérales et métalliques	S2-Cref ~ S2-RC ~ S2-Dref2 ~ S2-Dref1 (Conclusion obtenue suite au calcul d'incertitude)	Modification de la hiérarchie avec le mix ADEME : • S2-Cref plus performant que S2-RC ~ S2-Dref1 ~ S2-Dref2 Autres cas évalués : pas de modification du classement

Les systèmes à base de thermo-frigo-pompes (S2-RC et S2-Dref2) sont ceux qui causent le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, en comparaison aux systèmes à base de chaufferies gaz et groupes froids (S2-Cref et S2-Dref1). Pour l'épuisement des ressources énergétiques, ces systèmes ont moins d'impacts ou sont équivalents aux systèmes « classiques », et cette tendance est renforcée avec un mix électrique comme le mix ADEME 2050. En revanche, les systèmes à base de TFP contribuent davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

En ce qui concerne les systèmes « classiques » S2-Cref et S2-Dref1, un système centralisé cause légèrement moins de dommages environnementaux qu'un système décentralisé : le rendement énergétique supérieur compense en général les impacts supplémentaires (pertes thermiques du réseaux, construction d'infrastructures plus importantes, consommation électrique des pompes).

Pour les systèmes à base de TFP, le taux de couverture du besoin par les TFP est à maximiser :

- La différence de performance carbone entre les systèmes S2-RC et S2-Dref2 est principalement due au fait que le système S2-RC utilise une chaudière gaz en appoint, là où 100% des besoins sont couverts par les TFP pour le système S2-Dref2.
- Si on considère l'ensemble des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, on retrouve globalement les mêmes conclusions.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

Plus le recours à de l'appoint au gaz naturel sera limité, plus la performance carbone du système centralisé sera élevée. Dans la mesure du possible, il est donc préférable d'aller au-delà des 65% de couverture exigés pour être éligible au Fond Chaleur.

Le génie civil contribue de manière non-négligeable aux impacts de ces systèmes pour certains indicateurs, notamment le changement climatique. L'éco-conception des bâtiments de la chaufferie est donc une action pertinente pour réduire les émissions de GES liées à la production de chaleur et de froid.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les efforts réalisés pour utiliser des fluides frigorigènes avec un faible potentiel de réchauffement global ont permis de fortement réduire la contribution des pertes de fluide frigorigène. Dans l'étude, il a été fait l'hypothèse que les systèmes étudiés utilisaient du R1234ze. La contribution de ces fuites aux impacts du cycle de vie est maintenant quasiment négligeable.

La production des matériaux qui composent la TFP contribue assez peu aux impacts totaux du système pour les indicateurs qui sont responsables de dommages environnementaux les plus importants. Aucune donnée de première main n'ayant pu être collectée auprès des fabricants, il n'est pas possible d'établir des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes. La recherche d'un COP maximal reste le principal levier d'action pour diminuer les impacts environnementaux des TFP.

8.1.3 Cas d'étude 3

Hypothèses générales :

Besoin Refroidissement de 10 bâtiments en zone H2b : 10 x 100 KW, dont 0,3 MW de bâtiments publics et 0,7 MW de bureaux anciens

Energie à fournir 2,7 GWh de froid. Secondaire de chaque sous-station à 7/12°C

Systèmes	Principal	Appoint / Secours
S3-RC	Groupe froid à absorption (315 kW) sur nappe phréatique : 83 % du besoin froid	Groupe froid aérothermique (2 x 0,5 MW) : 17 % du besoin froid
S3-Cref	Groupe froid à compression aérothermie : 2 x 525 kW	Groupe froid aérothermie 525 kW
S3-Dref	Groupe froid aérothermie : 10 x 100 kW	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Particules fines (35 à 36%) Changement climatique (30 à 31%) Toxicité humaine, effets non-cancérogènes (15 à 20%) Autres (cumul de 14 à 19%)	Changement climatique (46 à 51%) Acidification terrestre (18 à 20%) Autres (cumul de 29 à 40%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de froid : Mix par usage « chauffage » et « climatisation », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Température de l'eau approvisionnée ;
- Nature du réfrigérant : utilisation de R134-a à la place du R1234ze considéré
- Impacts environnementaux alloués à la chaleur alimentant le groupe à absorption

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S3-RC 2. S3-Cref 3. S3-Dref	Chaleur fatale : • S3-RC est moins performant si le groupe à absorption n'est pas alimenté par de la chaleur fatale. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Particules fines	1. S3-RC ~ S3-Cref 2. S3-Dref	Chaleur fatale : • S3-RC est moins performant que S3-Cref si le groupe à absorption n'est pas alimenté par de la chaleur fatale. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Toxicité humaine, effets non cancérogènes	1. S3-Cref ~ S3-RC 2. S3-Dref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Acidification terrestre et eau douce	1. S3-RC ~ S3-Cref 2. S3-Dref	Chaleur fatale : • S3-RC est moins performant que S3-Cref si le groupe à absorption n'est pas alimenté par de la chaleur fatale. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources énergétiques	1. S3-RC 2. S3-Cref 3. S3-Dref	Chaleur fatale : • S3-RC est moins performant que S3-Cref si le groupe à absorption n'est pas alimenté par de la chaleur fatale. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources minérales et métalliques	1. S3-RC ~ S3-Cref 2. S3-Dref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S3-RC, basé sur un groupe à absorption, est le système qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, bien qu'il soit souvent équivalent au système centralisé conventionnel S3-Cref. Il contribue également moins à l'épuisement des ressources énergétiques, et est équivalent à S3-Cref sur celui des ressources minérales et métalliques. Cette conclusion n'est cependant valide que si la chaleur qui alimente le groupe à absorption est bien une chaleur fatale, qui serait perdue autrement. Si cette chaleur était générée par une énergie fossile comme le gaz naturel, le système n'aurait plus aucun intérêt en comparaison d'un groupe froid à compression.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser un groupe à absorption pour la production de froid sur un réseau urbain, uniquement dans le cas où il existe déjà un gisement de chaleur fatale exploitable, c'est-à-dire que cette chaleur serait autrement perdue. Aucune comparaison n'a été réalisée avec d'autres utilisations possibles de la chaleur fatale. Dans le cas où un gisement de chaleur fatale existe et que plusieurs options de valorisation sont possibles, une étude spécifique pour déterminer l'option qui présente le plus de bénéfices environnementaux est à mener.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les impacts environnementaux du système S3-RC, basé sur un groupe à absorption, sont principalement liés à sa phase d'utilisation, et en particulier à la consommation électrique des pompes utilisées par le réseau de froid. Aucune donnée de première main n'a pu être collectée auprès de fabricants de groupes froid à absorption dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible de faire des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes.

8.1.4 Cas d'étude 4

Hypothèses générales :

Besoin Chauffage de 20 bâtiments en zone H2b : 20 x 130 kW, soit 2,6 MW (logement neuf uniquement)

Energie à fournir 4,7 GWh de chauffage, secondaire de chaque sous-station à 50/40°C

Systèmes	Principal	Appoint / Secours
S4-RC	8412 m² de collecteurs solaires capteur plan Stockage d'énergie saisonnier enterré : 583 sondes de 35 m pour échangeur thermique	6 chaudières gaz de 0,6 MW
S4-Cref	Chaufferie gaz : 2 x 1,3 MW	Chaudière gaz 1,3 MW
S4-Dref1	Chaudière gaz : 20 x 130 kW	Aucun
S4-Dref2	Panneaux solaires : 20 x 130 kW	Chaudière gaz : 20 x 130 kW

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (42 à 89%) Toxicité humaine, effets cancérogènes (1 à 27%) Particules fines (9 à 22%) Autres (cumul de 1 à 9%)	Changement climatique (72 à 94%) Autres (cumul de 6 à 28%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Le taux de couverture solaire : niveau de dimensionnement amenant à des taux de couverture solaire différent pour un même ensoleillement ;
- Taux de recyclage des panneaux solaires.

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S4-RC 2. S4-Dref2 3. S4-Cref 4. S4-Dref1	Taux de couverture solaire : Pour S4-RC dimensionné à 70% des besoins, dégradation importante de la performance carbone du S4-RC, qui reste meilleure que S4-Dref2 mais quasiment équivalente. Autres cas évalués : pas de modification du classement
Toxicité humaine, effets cancérogènes	1. S4-Dref1 ~S4-Dref2 ~ S4-Cref 2. S4-RC	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Particules fines	1. S4-Dref1 2. S4-Dref2 ~ S4-Cref 3. S4-RC	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S4-RC 2. S4-Dref2 3. S4-Dref1 ~S4-Cref	Taux de couverture solaire : Pour S4-RC dimensionné à 70% des besoins, performance équivalente à S4-Dref2 Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources minérales et métalliques	1. S4-Dref1 2. S4-Cref ~S4-Dref2 3. S4-RC	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le cas d'étude montre que le système S4-RC, comportant un réseau de chaleur urbain alimenté par des panneaux solaires thermiques et un stockage inter-saisonnier est le système qui cause le moins de dommage à la santé humaine et aux écosystèmes. Ce système est plus performant que sa variante décentralisée S4-Dref2 car il possède un taux de couverture solaire plus élevé, il fait donc moins recours au système d'appoint gaz. Il est cependant à noter qu'il a des impacts supérieurs à ceux du S4-Dref2 sur les catégories de toxicité humaine et de particules fines, mais les dommages causés à la santé humaine via ces catégories d'impact sont compensés par les bénéfices liés à sa meilleure performance

carbone. Les systèmes S4-Cref et S4-Dref1, à base de chaudières gaz, sont ceux qui causent le plus de dommages à santé humaine et aux écosystèmes. Ces conclusions ne sont pas remises en cause par les analyses de sensibilités réalisées : ce classement est notamment conservé y compris dans le cas pessimiste où les panneaux ne seraient pas du tout recyclés en fin de vie.

Concernant les ressources, le système S4-RC contribue moins à l'épuisement des ressources énergétiques (fossiles principalement), mais nécessite davantage de ressources minérales et métalliques que les autres systèmes évalués.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

Le cas d'étude démontre l'intérêt environnemental de l'utilisation de capteurs solaires thermiques pour l'alimentation d'un réseau de chaleur urbain, en combinaison avec des systèmes de stockage court et long terme, par rapport aux autres systèmes comparés.

Cependant, la mise en œuvre de ce type de système est soumise à des contraintes techniques importantes. Il nécessite des investissements initiaux plus lourds, et demandent de disposer d'une surface suffisante pour installer tous les équipements nécessaires : le système modélisé[20] est composé de 8860 m² de panneaux solaires thermiques (7260 m² centralisés, et 80 m² par bâtiment), couplés à 583 sondes de 35 mètres de profondeur et 12 ballons de 120 m^3. Avec cela, il est possible d'alimenter 20 bâtiments de logements neufs, appelant 130 kW de puissance, ce qui correspond approximativement à 430 logements neufs de 70 m². Les caractéristiques des sondes à construire dépendent des caractéristiques du sol, qui doivent être déterminées par des études géotechniques en amont de la réalisation du système.

Par ailleurs, dans le contexte des réseaux de chaleur urbains, les systèmes solaires thermiques sont souvent déployés en combinaison avec des chaudières biomasses. L'ADEME a lancé en parallèle à cette étude une analyse du cycle de vie dédiée au mode de chauffage au bois, et il n'a pas été possible d'analyser le déploiement conjoint de ces deux technologies sur un cas d'étude de réseau de chaleur urbain. Le présent cas d'étude ne permet donc pas de comparer la performance environnementale d'un système solaire thermique + biomasse avec un système solaire thermique + stockage + gaz.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Seules des recommandations générales sont possibles, sur la base des postes les plus contributeurs aux impacts environnementaux. En ce qui concerne les capteurs plans en eux-mêmes, les fabricants pourront réduire leurs impacts environnementaux par deux moyens principaux :

- L'allongement de la durée de vie des panneaux, et maintien des performances dans le temps.
- Un travail sur la recyclabilité des panneaux, en garantissant que les différents matériaux soient facilement séparables.

[20] Ce dimensionnement est une extrapolation du système utilisé pour Drake Landing, en adaptant le modèle existant. Un dimensionnement en partant d'une page blanche aurait pu être très différents (stockages court terme de plus grande taille, sondes plus profondes, etc.). Cependant, le travail nécessaire à un tel dimensionnement n'était pas compatible avec les contraintes budgétaires de la présente étude, et nous avons dû nous contenter d'une adaptation du modèle existant.

8.1.5 Cas d'étude 5

Hypothèses générales :

Besoin Procédé industriel fonctionnant en 3 x 8h nécessitant une puissance froide de 2 MW

Energie à fournir 14,8 GWh de froid, régime 7/12°C

Systèmes	Description
S5-R	Groupe froid a absorption (2 MW) avec captage sur nappe phréatique
S5-Cref	Groupe froid à compression (2 MW) avec captage sur nappe phréatique

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (31 à 41%) Particules fines (34 à 48%) Toxicité humaine, effets cancérogènes (7 à 22%) Autres (cumul de 13 à 14%)	Changement climatique (55%) Acidification terrestre (18 à 19%) Autres (cumul de 26 à 27%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Impacts environnementaux alloués à la chaleur alimentant le groupe à absorption ;
- Nature du réfrigérant utilisé pour le groupe froid à compression : utilisation de R134-a à la place du R1234ze considéré
- Température de l'eau approvisionnée ;
- Température de la source d'énergie fatale.

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S5-R 2. S5-Cref	Chaleur fatale: • S5-R est 15 fois plus impactant si le groupe à absorption est alimenté par du gaz naturel plutôt que de la chaleur fatale. • On a donc S5-Cref plus performant que S5-R dans ce cas Autres cas évalués : pas de modification du classement
Particules fines	1. S5-R 2. S5-Cref	Chaleur fatale: • S5-R est 3 fois plus impactant si le groupe à absorption est alimenté par du gaz naturel plutôt que de la chaleur fatale. • On a donc S5-Cref plus performant que S5-R dans ce cas Autres cas évalués : pas de modification du classement
Toxicité humaine, effets cancérogènes	1. S5-Cref 2. S5-R (faibles écarts au regard de la qualité du modèle)	Chaleur fatale: • S5-R est 1,3 fois plus impactant si le groupe à absorption est alimenté par du gaz naturel plutôt que de la chaleur fatale. • L'écart entre S5-Cref et S5-R devient significatif. Autres cas évalués : pas de modification du classement

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Acidification terrestre et eau douce	1. S5-R 2. S5-Cref	Chaleur fatale: • S5-R est 4 fois plus impactant si le groupe à absorption est alimenté par du gaz naturel plutôt que de la chaleur fatale. • On a donc S5-Cref plus performant que S5-R dans ce cas Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources énergétiques	1. S5-R 2. S5-Cref	Chaleur fatale: • S5-R est 5 fois plus impactant si le groupe à absorption est alimenté par du gaz naturel plutôt que de la chaleur fatale. • On a donc S5-Cref plus performant que S5-R dans ce cas Autres cas évalués : pas de modification du classement
Ressources minérales et métalliques	1. S5-R 2. S5-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S5-R, basé sur un groupe à absorption, est clairement le système qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il contribue également moins à l'épuisement des ressources énergétiques, ainsi que celui des ressources minérales et métalliques. Cette conclusion n'est cependant valide que si la chaleur qui alimente le groupe à absorption est bien une chaleur fatale, qui serait perdue autrement. Si cette chaleur était générée par une énergie fossile comme le gaz naturel, le système n'aurait plus aucun intérêt en comparaison d'un groupe froid à compression.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser un groupe à absorption pour la production de froid pour un usage industriel, pour une boucle en régime 7/12°C, uniquement dans le cas où il existe déjà un gisement de chaleur fatale exploitable, c'est-à-dire que cette chaleur serait autrement perdue. Aucune comparaison n'a été réalisée avec d'autres utilisations possibles de la chaleur fatale. Dans le cas où un gisement de chaleur fatale existe et que plusieurs options de valorisation sont possibles, une étude spécifique pour déterminer l'option qui présente le plus de bénéfices environnementaux est à mener.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les impacts environnementaux du système S5-RC, basé sur un groupe à absorption, sont principalement liés à sa phase d'utilisation, et en particulier à la consommation électrique des pompes utilisées par le réseau de froid. Aucune donnée de première main n'a pu être collectée auprès de fabricants de groupes froid à absorption dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible de faire des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes.

8.1.6 Cas d'étude 6

Hypothèses générales :

Besoin Procédé industriel nécessitant une puissance chaude de 250 kW en 3 x 8h

Energie à fournir 1,8 GWh de chaud, en régime 55/35°C

Systèmes	Description
S6-R	Pompe à chaleur à ammoniac 250 kW
S6-Cref	Chaufferie gaz (250 kW)

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (40 à 89%) Particules fines (9 à 38%) Autres (cumul de 2 à 22%)	Changement climatique (55% à 94%) Acidification terrestre et eau douce (3 à 19%) Autres (cumul de 3 à 26%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Nature du réfrigérant utilisé pour la pompe à chaleur : utilisation de R134-a ou de R1234ze à la place de l'ammoniac.
- Température de l'eau approvisionnée ;

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S6-R 2. S6-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Particules fines	1. S6-Cref 2. S6-R	Avec le mix ADEME, le classement est inversé Avec les mix usage « chauffage » ou « industrie », les écarts au profit du S6-Cref sont renforcés. Pas de modifications du classement pour les autres cas analysés.
Acidification terrestre et eau douce	1. S6-R 2. S6-Cref	Avec le mix usage chauffage ou le mix ADEME, les écarts entre les deux systèmes sur cet indicateur ne sont pas significatifs Pas de modifications du classement pour les autres cas analysés.
Ressources énergétiques	1. S6-R 2. S6-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	1. S6-Cref 2. S6-R	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S6-R est clairement celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il s'agit aussi de celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il contribue davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser une pompe à chaleur à ammoniac pour la production de chaleur pour un usage industriel nécessitant une boucle 55/35°C. Dans le cas d'étude analysé, ce système permet une réduction des émissions de GES de la production de chaleur de l'ordre de 90% par rapport à une chaudière gaz, sans causer d'impacts significatifs pour d'autres catégories d'impacts environnementaux. Ces systèmes sont donc à privilégier pour ces usages industriels (ex : procédé de séchage, préchauffage d'un tunnel de cuisson, chauffage d'un bain pour un traitement de métaux, de réchauffage de liquide ou gaz froid (ex : chauffage du GNL).

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les impacts environnementaux des pompes à chaleur à ammoniac sont principalement liés à sa phase d'utilisation, et en particulier à la consommation électrique. La recherche d'un COP maximal reste donc la principale recommandation d'éco-conception. Aucune donnée de première main n'a pu être collectée auprès de fabricants de pompe à chaleur à ammoniac dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible de faire des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes.

8.1.7 Cas d'étude 7

Hypothèses générales :

Besoin Procédé industriel nécessitant une puissance chaude de 1,7 MW

Energie à fournir 12 GWh de chaud, en régime 92/55°C

Systèmes	Description
S7-R	Pompe à chaleur hybride absorption et compression (1.7 MW) alimentée en chaleur fatale, sur nappe phréatique
S7-Cref	Chaufferie gaz (1,7 MW)

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (41 à 90%) Particules fines (9 à 39%) Autres (cumul de 1 à 20%)	Changement climatique (54% à 94%) Acidification terrestre et eau douce (3 à 19%) Autres (cumul de 3 à 27%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Impacts environnementaux alloués à la chaleur alimentant le groupe à absorption
- Température de l'eau approvisionnée ;

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S7-R 2. S7-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Particules fines	1. S7-Cref 2. S7-R	Avec le mix ADEME, les impacts de S7-R sont significativement plus élevés.
Acidification terrestre et eau douce	S7-R ~ S7-Cref	• Avec les mix électriques usage chauffage et mix ADEME, S7-R a des impacts plus élevés que S7-Cref • Avec le mix électrique usage Industrie, S7-R a des impacts plus faibles que S7-Cref. • Si le groupe à absorption n'est pas alimenté par de la chaleur fatale, S7-R a des impacts plus importants que S7-Cref, sans que la différence ne soit réellement significative au regard des écarts nécessaires pour cet indicateur. • Pour une boucle à température 5°C plus basse (87/50°C), S7-R plus performant que S7-Cref • Pour une chaleur fatale 5°C plus haute (55°C), S7-R plus performante que S7-Cref
Ressources énergétiques	1. S7-R 2. S7-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	3. S7-Cref 4. S7-R	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S-R est clairement celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il s'agit aussi de celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il contribue davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser une pompe à chaleur à ammoniac pour la production de chaleur pour un usage industriel nécessitant une boucle 55/35°C. Dans le cas d'étude analysé, ce système permet une réduction des émissions de GES de la production de chaleur de l'ordre de 90% par rapport à une chaudière gaz, sans causer d'impacts significatifs pour d'autres catégories d'impacts environnementaux. Ces systèmes sont donc à privilégier pour ces usages industriels (ex : procédé de séchage, préchauffage d'un tunnel de cuisson, chauffage d'un bain pour un traitement de métaux, de réchauffage de liquide ou gaz froid (ex : chauffage du GNL).

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les impacts environnementaux des pompes à chaleur à ammoniac sont principalement liés à sa phase d'utilisation, et en particulier à la consommation électrique. La recherche d'un COP maximal reste donc la principale recommandation d'éco-conception. Aucune donnée de première main n'a pu être collectée auprès de fabricants de pompe à chaleur à ammoniac dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible de faire des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes.

8.1.8 Cas d'étude 8

Hypothèses générales :

Besoin Procédés industriels nécessitant une puissance chaude de 1,1 MW et puissance froide de 0,8 MW

Energie à fournir 3,9 GWh de chaud en régime 55/50°C et 5,7 GWh de froid en régime -11/-4°C

Systèmes	Description
S8-R	Groupe froid avec de l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante
S8-Cref	Chaufferie gaz (1,1 MW) et Groupe froid à compression (0,8 MW)

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (41 à 76%) Particules fines (18 à 39%) Autres (cumul de 6 à 20%)	Changement climatique (54% à 84%) Acidification terrestre et eau douce (7 à 19%) Autres (cumul de 9 à 27%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Nature du réfrigérant : utilisation de R134-a à la place du R1234ze considéré ;

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S8-R 2. S8-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Particules fines	1. S8-R 2. S8-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Acidification terrestre et eau douce	1. S8-R 2. S8-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S8-R 2. S8-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	1. S8-R 2. S8-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S8-R est clairement celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il s'agit aussi de celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques et à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser un groupe froid à l'ammoniac en montage thermo-frigo-pompe sur tour aéroréfrigérante pour réduire les impacts environnementaux de la production combinée de chaleur et de froid. Dans le cas d'étude analysé, ce système permet une réduction des émissions de GES de la production de chaleur de l'ordre de 85% par rapport à l'utilisation d'une chaudière gaz et d'un groupe froid à compression. Les impacts environnementaux sur les principales catégories d'impacts causant des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes sont également réduits. Ces systèmes sont donc à privilégier pour ces usages industriels où de la production de chaleur et de froid est nécessaire sur le même site (ex : laiterie, fromagerie, charcuterie, abattoir avec un besoin de froid en base pour le conditionnement et un besoin en chaleur pour le nettoyage).

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les impacts environnementaux d'une thermo-frigo-pompe sont principalement liés à sa phase d'utilisation, et en particulier à la consommation électrique. La recherche d'une efficacité énergétique maximale reste donc la principale recommandation d'éco-conception. Aucune donnée de première main n'a pu être collectée auprès de fabricants de pompe à chaleur à ammoniac dans le cadre de cette étude. Il n'est donc pas possible de faire des recommandations d'éco-conception détaillées pour ces systèmes.

8.1.9 Cas d'étude 9

Hypothèses générales :

Besoin Procédé industriel nécessitant une puissance chaude de 2,0 MW

Energie à fournir 10 GWh de chaleur en régime 80/50°C

Systèmes	Principal	Appoint et secours
S9-RC	Centrale solaire thermique capteur plan (2,0 MW) : 53 % du besoin chaud	Chaudière gaz (2.0 MW) : 46% du besoin chaud
S9-Cref	Chaufferie gaz (2,0 MW)	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (74 à 89%) Autres (cumul de 2 à 13%)	Changement climatique (89% à 94%) Autres (cumul de 6 à 11%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian »
- Taux de couverture solaire : des taux de 43%, 63% et de 100% seront comparés avec la référence qui se situe à 53 %
- Taux de recyclage des panneaux solaires

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S9-R 2. S9-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S9-R 2. S9-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	1. S9-Cref 2. S9-R	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S9-R est clairement celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il s'agit aussi de celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il contribue davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser une centrale solaire thermique avec des capteurs plan pour réduire les impacts environnementaux de la production de chaleur dans un contexte industriel. Dans le cas d'étude analysé, ce système permet une réduction des émissions de GES de la production de chaleur de l'ordre de 50% par rapport à l'utilisation d'une chaudière gaz seule. Ce système cause également moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, et il contribue moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il a un impact plus important sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques. Ces systèmes présentent donc un intérêt particulier pour réduire les impacts environnementaux de la production de chaleur pour alimenter un procédé de pasteurisation, de préchauffage d'un tunnel de cuisson ou de séchage.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les centrales solaires thermiques ont déjà une performance satisfaisante en matière de performance carbone en comparaison des centrales à gaz. La phase de production des équipements (capteurs, ballons tampons, réseaux) est responsable de moins de 3% des émissions de GES du système, alors que ces capteurs produisent plus de 50% du besoin annuel de chaleur. La production de ces équipements à une influence non-négligeable sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques, mais la production des ballons tampons contribue davantage que la production des capteurs plan.

8.1.10 Cas d'étude 10

Hypothèses générales :

Besoin Procédé industriel fonctionnant en 2 x 8h nécessitant une puissance chaude de 1,0 MW

Energie à fournir 5 GWh de chaleur en régime 100/40°C

Systèmes	Principal	Appoint et secours
S10-RC	Centrale solaire thermique tube sous vide (1,0 MW) : 12 % du besoin chaud	Chaudière gaz (1.0 MW) : 88 % du besoin chaud
S10-Cref	Chaufferie gaz (1,0 MW)	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (69 à 88%) Autres (cumul de 12 à 31%)	Changement climatique (89% à 94%) Autres (cumul de 6 à 11%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et « industrie », mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian »
- Taux de couverture solaire : des taux de 25 % et de 45 %, comparés avec la référence de 35 %
- Taux de recyclage des panneaux solaires

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S10-R 2. S10-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S10-R 2. S10-Cref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	1. S10-Cref 2. S10-R	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S10-R est celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. Il s'agit aussi de celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il contribue davantage à l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

L'étude montre l'intérêt d'utiliser une centrale solaire thermique avec des capteurs plan pour réduire les impacts environnementaux de la production de chaleur dans un contexte industriel. Dans le cas d'étude analysé, ce système permet une réduction des émissions de GES de la production de chaleur de l'ordre de 50% par rapport à l'utilisation d'une chaudière gaz seule. Ce système cause également moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, et il contribue moins à l'épuisement des ressources énergétiques. Cependant, il a un impact plus important sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques. Ces systèmes présentent donc un intérêt particulier pour réduire les impacts environnementaux de la production de chaleur pour alimenter un procédé de pasteurisation, de préchauffage d'un tunnel de cuisson ou de séchage.

Les maitres d'ouvrages doivent également être vigilants à la fin de vie des panneaux à capteurs sous vide. S'ils ne sont pas recyclés, les impacts du système sur l'épuisement des ressources minérales et fossiles peuvent être multipliées par 1,7. Cependant, même en cas de non-recyclage des panneaux à capteurs sous vide, les émissions de GES de ces panneaux resteraient plus faibles que celles d'une chaudière gaz, à production de chaleur équivalente

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les centrales solaires thermiques ont déjà une performance satisfaisante en matière de performance carbone en comparaison des centrales à gaz. La phase de production des équipements (capteurs, ballons tampons, réseaux) est responsable d'environ de 5% des émissions de GES du système, alors que ces capteurs produisent plus de 12% du besoin annuel de chaleur. La production des panneaux à capteurs sous vide a une influence non-négligeable sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques (environ 44% de l'impact sur cet indicateur).

8.1.11 Cas d'étude 11

Hypothèses générales :

Besoin Chauffage de 130 bâtiments en zone H2b : 130*345 kW et 45 MW souscrit

Energie à fournir 67 GWh en régime 75/50°C

Systèmes	Principal	Appoint / Secours
S11-RC	Doublet de géothermie profonde (1850 m de profondeur) redressé par 2 pompes à chaleur haute température de 18 MW 83% du besoin chaud	7*6 MW de chaudières installées 17% du besoin chaud
S11-Cref	Chaufferie gaz : 9 * 6 MW	
S11-Dref1	Chaudières gaz : 130 * 345 kW	Aucun

Sources des dommages environnementaux :

Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources
Changement climatique (51 à 89%) Particules fines (9 à 28%) Autres (cumul de 2 à 21%)	Changement climatique (46 à 94%) Autres (cumul de 6 à 32%)	Ressources énergétiques Ressources minérales et métalliques

Analyses de sensibilité réalisées :

- Mix électrique considéré pour les équipements de production de chaleur : Mix par usage « chauffage » et mix visions ADEME 2050 « Nucléaire Médian » ;
- Nature du réfrigérant du système S11-RC

Comparaison des systèmes :

Indicateurs pertinents	Classement des systèmes	Modifications lors analyses de sensibilité
Changement climatique	1. S11-RC 2. S11-Cref 3. S11-Dref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Particules fines	1. S11-Dref 2. S11-Cref 3. S11-RC	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources énergétiques	1. S11-RC 2. S11-Cref ~S11-Dref	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués
Ressources minérales et métalliques	1. S11-Dref 2. S11-Cref 3. S11-RC	Aucune modification du classement dans tous les cas évalués

Le système S11-RC est celui qui cause le moins de dommages à la santé humaine et aux écosystèmes. C'est également celui qui contribue le moins à l'épuisement des ressources énergétiques. En revanche, il a des impacts plus élevés que les autres en ce qui concerne l'épuisement des ressources minérales et métalliques.

Recommandations à destination des maitres d'ouvrages :

Plus le recours à de l'appoint au gaz naturel sera limité, plus la performance carbone du système sera élevée. Dans la mesure du possible, il est donc préférable d'aller au-delà des 65% de couverture exigés pour être éligible au Fond Chaleur.

La phase de forage et le génie civil contribuent de manière non-négligeable aux impacts de ces systèmes pour certains indicateurs. Les quantités de béton et d'acier sont donc à réduire dans la mesure du possible.

Recommandations d'éco-conception à destination des fabricants de systèmes :

Les efforts réalisés pour utiliser des fluides frigorigènes avec un faible potentiel de réchauffement global ont permis de fortement réduire la contribution des pertes de fluide frigorigène. Dans l'étude, il a été fait

l'hypothèse que les systèmes étudiés utilisaient du R1234ze. La contribution de ces fuites aux impacts du cycle de vie est maintenant quasiment négligeable

La recherche d'un COP maximal reste le principal levier d'action pour diminuer les impacts environnementaux de PAC de grande puissance.

8.2 Limites à la généralisation des conclusions

L'étude a permis d'analyser les impacts environnementaux du cycle de vie de systèmes de production de chaleur et de froid pour onze cas d'études. **Les conclusions obtenues sont spécifiques à chaque cas d'étude, et elles ne peuvent pas être généralisées à d'autres situations sans s'assurer que la modification des hypothèses n'a pas d'influence significative sur les résultats**. Des analyses de sensibilité locales ont été réalisées pour vérifier la robustesse de conclusions à la modification de certaines hypothèses clés, mais de nombreuses autres hypothèses potentiellement influentes n'ont pas été étudiées. Nous invitons donc le lecteur de ce rapport à la prudence dans l'interprétation qu'il fera des résultats obtenus. Ce paragraphe présente plusieurs points d'attention importants à prendre en compte pour interpréter les résultats de cette étude.

Comparaison impossible entre deux systèmes issus de cas d'étude différents

Les cas d'étude ont été définis de telle manière que tous les systèmes comparés remplissent la même unité fonctionnelle, représentative d'un usage particulier. Ces unités fonctionnelles sont différentes d'un cas d'étude à l'autre, **il n'est donc pas rigoureux de comparer les impacts environnementaux de deux systèmes issus de deux cas d'étude différents, même en rapportant les impacts calculés à un kilowattheure de chaleur ou de froid injecté dans le réseau de chaleur ou dans le procédé industriel**. C'est un point particulièrement important lorsqu'ils s'agit de systèmes basés sur des pompes à chaleur, dont le coefficient de performance énergétique est fortement dépendant du niveau de température ciblé.

Conclusions non transposables à d'autres contextes

Les conclusions ont été obtenues en faisant des hypothèses représentatives d'un contexte géographique et temporel spécifique : pour chaque cas d'étude, la zone climatique modélisée est précisée, et l'évaluation a été réalisée dans le but d'être valide pour la période 2019-2024. Si la tendance actuelle se poursuit, il est possible que l'indice de rigueur climatique moyen évolue à la baisse dans les décennies à venir, ce qui pourrait affecter le besoin de chaleur des bâtiments. **Les conclusions obtenues dans ces cas d'étude ne sont donc pas nécessairement transposables à d'autres situations** (autres zones climatiques, autres pays, autres périodes temporelles) **sans des analyses supplémentaires qui n'ont pas été réalisées**.

De plus, les systèmes ont été comparés dans le contexte de la production électrique et de l'approvisionnement gazier actuel en France. L'étude repose sur l'hypothèse que le choix d'un système de production de chaleur ou de froid à l'échelle d'un réseau de chaleur n'a pas d'influence sur la manière dont l'électricité est produite en France ou sur les sources d'approvisionnement en gaz naturel. Il est important de noter que **l'étude ne permet donc pas de se prononcer sur l'intérêt de généraliser au niveau français une solution technique au détriment d'une autre**. Ce type de changement est susceptible d'avoir des effets d'échelle importants, qui nécessiteraient d'être analysés via une méthodologie d'analyse du cycle de vie conséquentielle.

Cas d'étude réseaux urbains pour bâtiments neufs : généralisation à des bâtiments plus performants que la RT2012

Plusieurs cas d'étude concernent le chauffage de bâtiments neufs (cas d'étude 1, 2 et 4). Les courbes de charges utilisées pour la demande de chaleur à laquelle doivent répondre les systèmes comparés sont représentatives des bâtiments neufs construits au moment de la réalisation de l'étude, respectant la Réglementation Thermique 2012 (RT2012). Il est prévu que la future Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) renforce les exigences de performance énergétique des bâtiments. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments peut avoir deux types de conséquences :

- Une baisse de la demande annuelle de chaleur : la rentabilité d'un réseau de chaleur est fortement dépendante de la densité énergétique. Plus la zone sur laquelle les besoins sont concentrés est petite, plus il est rentable de construire un réseau de chaleur. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est susceptible de faire baisser cette densité énergétique, et donc d'augmenter la longueur des réseaux et les pertes énergétiques au transport de la chaleur. Au vu de la contribution de ces deux postes aux impacts environnementaux des systèmes comparés, cela ne semble pas être susceptible de remettre en cause les conclusions.
- Une concentration des besoins de chaleur sur des périodes plus courtes : les bâtiments mieux isolés thermiquement ont généralement des besoins de chauffage concentrés sur les périodes les plus froides. Les impacts des systèmes à base de PAC sont principalement dus au mix électrique considéré. Dans l'étude, un mix électrique spécifique à chaque système a été calculé, en fonction des appels de puissance de la PAC sur le réseau électrique, et du mix électrique à chaque heure tel que fournit par RTE. La courbe d'appel de puissance des PAC au cours de l'année a donc une forme différente en fonction du type de bâtiment alimenté. Un système à base de PAC alimentant des bâtiments mieux isolés aura donc un mix spécifique différent, avec probablement une part plus importante des moyens de production de pointe.

Au vu de la contribution de ces deux postes aux impacts environnementaux des systèmes comparés, nous considérons que les conclusions obtenues sur ces cas d'étude sont probablement généralisables à des bâtiments neufs plus performants que ceux respectant la RT2012, dans la mesure où le régime de température 50/40°C reste le même. Cette conjecture mériterait cependant d'être vérifiée en réalisant des calculs spécifiques à un réseau de chaleur dimensionné pour des bâtiments respectant la RE2020, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude.

8.3 Enseignements généraux, tous cas d'étude confondus

Malgré les limites présentées ci-dessous, un certain nombre d'enseignements généraux peuvent être tirés des cas d'étude réalisés. On retrouve des conclusions similaires entre les cas d'étude sur l'origine des impacts environnementaux des systèmes de production de chaleur et de froid, qui sont présentées ci-dessous. Ces enseignements restent cependant assez génériques.

La phase d'usage, principale responsable des impacts environnementaux des systèmes de production de chaleur et de froid

La phase d'usage des systèmes, et en particulier les émissions de polluants liés à la consommation d'électricité ou de gaz naturel, sont les principales sources des impacts environnementaux pour l'ensemble des systèmes étudiés. Pour les systèmes à base de solaire thermique (voir cas d'étude 4, 9 et 10), ce sont également les émissions des chaudières gaz utilisées en appoint qui sont responsables de la majeure partie de l'impact environnemental sur une très grande majorité des indicateurs.

Un nombre limité de catégories d'impact responsables des principaux dommages environnementaux causés

Le changement climatique est la catégorie d'impact qui est responsable de la majorité des dommages causés à la santé humaine et aux écosystèmes, pour tous les systèmes étudiés.

Les catégories d'impacts Particules fines et Toxicité humaine (cancérogène et non-cancérogènes) sont responsables de dommages importants à la santé humaine, en particulier pour les systèmes à base de PAC. Au contraire, les impacts causés par l'appauvrissement de la couche d'ozone, la formation d'ozone photochimique ou les radiations ionisantes représentent une part très faible des dommages totaux à la santé humaine pour l'ensemble des systèmes étudiés.

En ce qui concerne les écosystèmes, les dommages causés par l'acidification terrestre représentent également une part non négligeable des impacts totaux, bien qu'ils soient systématiquement plus faibles que ceux causés par le changement climatique. Les autres catégories d'impact n'ont été sélectionnées comme pertinentes pour aucun des cas d'étude. En particulier, les systèmes renouvelables ont globalement tendance à nécessiter une emprise au sol plus importante que les systèmes de référence auxquels ils ont été comparés. Les résultats des modèles de caractérisation des dommages aux

écosystèmes indiquent que les dommages causés par l'usage des sols restent relativement faibles par rapport à ceux causés par le changement climatique et l'acidification terrestre.

Enfin, en ce qui concerne les ressources naturelles, l'ensemble des systèmes contribuent fortement à l'épuisement des ressources énergétiques (énergies fossiles ou uranium, selon le type de système). Pour l'épuisement des ressources minérales et métalliques, la plupart des systèmes renouvelables étudiés a également des impacts supérieurs aux systèmes de référence à base de chaudières gaz.

Cas d'étude réseaux urbains : influence majeure des choix de dimensionnement

Les choix de dimensionnement qui ont été faits dans cette étude sont représentatifs des choix qui sont actuellement les plus courants : le système principal est dimensionné pour atteindre le taux d'EnR&R minimal requis pour bénéficier du Fonds Chaleur, et un système d'appoint est utilisé en complément.

L'étude montre que pour l'ensemble des cas d'étude de réseaux urbains, les systèmes qui assurent l'appoint, même s'ils couvrent une faible part du besoin de chaleur ou de froid, peuvent avoir une contribution très significative aux impacts environnementaux de l'ensemble du réseau. Dimensionner le système global pour minimiser le recours à l'appoint (notamment chaudière gaz) va nécessairement améliorer la performance environnementale du système. Pour certains cas d'étude, le système décentralisé de référence à base de pompes à chaleur cause moins de dommages environnementaux que le système étudié (centralisé renouvelable) : en effet, pour les systèmes centralisés, une part de la production est couramment assurée par un système d'appoint, souvent alimenté par des énergies fossiles (ici le gaz), alors que ce n'est pas une pratique courante en décentralisé. Un choix de dimensionnement différent pour ce système centralisé est susceptible de modifier cette conclusion. Aucune analyse de sensibilité sur le dimensionnement n'a pu être réalisée dans le cadre de cette étude.

Des recommandations d'éco-conception à portée limitée

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, nous avons sollicité plusieurs fabricants de systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance, afin de collecter des données primaires sur l'étape de fabrication de ces systèmes et sur leur composition matière. En ce qui concerne les systèmes à base de pompe à chaleur, aucun fabricant contacté n'a souhaité fournir de données à l'étude. Les données utilisées ont donc été estimées sur la base de fiches techniques disponibles publiquement et de jugement experts réalisés par Tractebel.

La qualité des données obtenue a été jugée suffisante pour répondre à l'objectif de comparaison des systèmes sur un même cas d'étude. En revanche, les recommandations d'éco-conception à destination des fabricants qui ont pu être faites ont une portée limitée, compte tenu de la faible représentativité des données utilisées.

8.4 Perspectives

Les cas d'étude présentés dans ce rapport apportent un éclairage sur certains contextes d'utilisation des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance. Plusieurs autres questions importantes relatives à ces systèmes n'ont pas été traités dans l'étude.

Autres technologies pour la production de chaleur et de froid de grande puissance

L'étude n'a pas couvert tous les types de systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance qui peuvent être mis en œuvre sur des réseaux urbains ou dans des contextes industriels. On peut notamment citer les chaudières biomasses, qui peuvent être mises en œuvre en appoint d'une centrale solaire thermique. Le mix gazier est également susceptible d'évoluer à l'avenir, avec une part plus importante du biogaz. Les impacts environnementaux de chaudières gaz alimentés avec autre chose que du gaz naturel (fossile) n'ont pas été réalisées.

Perspectives pour les systèmes alimentant des réseaux urbains

Pour les réseaux urbains, les cas d'étude analysés concernent des bâtiments neufs (RT2012), ou des bâtiments anciens (pour le cas d'étude 11 uniquement). Des cas d'étude supplémentaires pourraient

être réalisés avec des logements ayant une performance énergétique compatible avec la RE2020. Plutôt que de limiter l'analyse au choix du seul système de production de chaleur, il serait également pertinent d'évaluer des actions combinées qui incluent la rénovation thermique des bâtiments alimentés.

Etant donné l'importance des choix de dimensionnement, il serait intéressant d'évaluer des systèmes centralisés dimensionnés de manière à limiter le recours à l'appoint, et de comparer leurs impacts environnementaux à ceux des systèmes décentralisés.

Perspectives pour les systèmes industriels

Pour les usages industriels, aucune comparaison de performance environnementale entre les systèmes solaire thermique et les systèmes à base de PAC n'a été réalisée, alors qu'ils peuvent répondre à des besoins similaires, notamment sur les faibles températures de chauffage.

Références bibliographiques

[1] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, «International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010.,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2010.

[2] Ministère de la transition écologique et solidaire, «Programmation Pluriannuelle de l'énergie. 2019-2023. 2024-2028,» avril 2020. [En ligne]. Available: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf. [Accès le juin 2020].

[3] FEDENE, «Enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid. Edition 2019,» Novembre 2019. [En ligne]. Available: https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2019/12/SNCU-Rapport-Global-2019-Restitution-enquete-r%C3%A9seaux.pdf. [Accès le Juin 2020].

[4] FEDENE, «Les réseaux de chaleur et de froid. Chiffres clés, analyses et évolution. Résultats de l'enquête annuelle.,» 2018.

[5] Institut International du Froid, «Le rôle du froid dans l'économie mondiale. 29e note d'information sur les technologies du froid.,» Novembre 2015. [En ligne]. Available: https://iifiir.org/fr/documents/37048/download. [Accès le Juin 2020].

[6] ADEME, «La maitrise de l'énergie dans le froid industriel,» 2017.

[7] Commissariat général au développement durable, «Évaluation des degrés-jours unifiés au niveau régional et départemental,» Service des données et études statistiques, 2020.

[8] PEP ecopassport ®, «PCR : Règles de définition des catégories de produits relatives aux équipements électriques, électroniques et de génie climatique,» 2015.

[9] The ecoinvent Association, «New Data in ecoinvent 3.5,» August 2018. [En ligne]. Available: https://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-35/new-data-in-ecoinvent-35/new-data-in-ecoinvent-35.html. [Accès le 11 mars 2020].

[10] European Commission, «PEFCR Guidance document. Guidance for the development of Product Environmetnal Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3,» December 2017. [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf. [Accès le June 2020].

[11] Deloitte Développement Durable, «Analyse du cycle de vie de dispositifs de réemploi ou réutilisation (BtoC) d'emballages ménagers en verre,» 291, 2018.

[12] S. Fazio, V. Castellani, S. Sala, E. Schau, E. Secchi et L. Zampori, «Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method, EUR 28888 EN,» European Commission, Ispra, ISBN 978-92-79-76742-5, doi:10.2760/671368, JRC109369, 2018.

[13] PRé Sustainability, «What's new in SimaPro 9.0?,» 12 Mars 2019. [En ligne]. Available: https://simapro.com/2019/whats-new-in-simapro-9-0/. [Accès le 11 mars 2020].

[14] S. Pfister et S. Suh, «Environmental impacts of thermal emissions to freshwater: spatially explicit fate and effect modeling for life cycle assessment and water footprinting,» *The International Journal of Life Cycle Assessment,* vol. 20, p. 927–936, 2015.

[15] Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Seine-Normandie, «La chaleur du sous-sol,» [En ligne]. Available: http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article98. [Accès le Juin 2020].

[16] Guide Bâtiment Durable, «Déterminer les caractéristiques du sol,» Juillet 2016. [En ligne]. Available: https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/determiner-les-caracteristiques-du-sol.html?IDC=8946#. [Accès le Juin 2020].

[17] Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, «Pompes à chaleur géothermique : Analyse de différentes techniques de capteurs enterrés,» Février 2015. [En ligne]. Available: https://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/rapport-rage-pac-geothermiques-techniques-capteurs-enterres-2015-02_1.pdf. [Accès le Juin 2020].

[18] BRGM, «Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole. Rapport final. BRGM/RP-56333-FR,» Mars 2009. [En ligne]. Available: http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-56333-FR.pdf. [Accès le Juin 2020].

[19] R. D. C. Team, «R: A language and environment for statistical computing,» R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria ISBN 3-900051-07-0, 2010. [En ligne]. Available: http://www.R-project.org.

[20] C. Roux, «Analyse de Cycle de Vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis,» 2016.

[21] PEP Ecopassport, «Profil environnemental: ballon de stockage d'eau chaude sanitaire collectif,» 2019.

[22] PEP Ecopassport - UNICLIMA, «Capteur solaire thermique plans vitrés à circulation de liquide,» 2019.

[23] Savosolar, «Capteur Savo 15-SG-M,» 2020.

[24] Viessmann, «Vitomax 100-LW,» 2015.

[25] Babcock, «Chaudières eau chaude haut rendement à trois parcours de fumées,» 2011.

[26] De Dietrich , «Chaudières gaz à condensation pour chauffage seul IX 145-245».

[27] Veissman, «Feuille technique Vitomax 200-LW,» 2015.

[28] PEP Ecopassport, «Chaudière à condensation gaz collective chauffage seul,» 2018.

[29] Carrier, «AquaForce Condenserless and water cooled liquid chillers,» 2019.

[30] Carrier, «Refroidisseurs de liquide centrifuges hermétiques à haut rendement».

[31] Viessmann, «Vitocal 300-A,» 2015.

[32] Grundfos, «Fiche technique pour CRN 95-3-2 A-P-A-V-HQQV,» 2020.

[33] Grundfos, «Fiche technique CR 45-13-2 A-F-A-E-HQQE,» 2020.

[34] Grundfos, «Fiche technique NB 65-250/269 AF2ABQQE,» 2020.

[35] Grundfos, «Fiche technique pour CM 10-2 A-R-A-E-AVBE F-A-A-N,» 2020.

[36] Cahors, «Transformateurs de distribution».

[37] Association AFCE, «Les GWP des fluides frigorigènes,» 2020. [En ligne]. Available: http://www.afce.asso.fr/fluides-frigorigenes/les-gwp-des-fluides/.

[38] J. Bukoski, A. Mui et M. Smead, «Analytical Modeling and Life Cycle Assessment of a double-effect solar powered absorption Chiller,» 2011.

[39] J. Avelino Dominguez Patino, A. Rodriguez Martinez, R. J. Romero, J. Ibarra-Bahena et M. L. Dominguez Patino, «Environmental Impact Assessment for an Absorption Heat Trasnformer,» 2016.

[40] Trane, «Series R Helical Rotary Liquid Chillers,» 2016.

[41] Terrinov, «Demande d'autorisation d'exploitation et d'ouverture de travaux code minier,» 2018.

[42] Unical , «Fiche technique échangeurs à plaques».

[43] Europont Verlinde, «Encombrements pont bipoutre posé,» 2004.

[44] Jacir, «Topaz Neo Refroidisseur adiabatique,» 2019.

[45] Robur, «Absorption heat pumps and chillers powered by natural gas and renewable energy».

[46] B. Greening et A. Azapagic, «Domestic heat pumps : Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK,» *Energy,* vol. 39, n° %11, pp. 205-217, 2012.

[47] Terrinov, «Etude d'impact et évaluation environnementale,» 2018.

[48] De Dietrich, «Chaudières fioul/gaz au sol en acier C 330-C 630-... ECO».

[49] KWT de Viessmann group, «Pompes à chaleur jusqu'à 2000 kW».

[50] Thermax, «Multi-energy vapour absorption machines».

[51] Grundfos, «Fiche technique CR 45-3-2 A-F-A-E-HQQE,» 2020.

[52] Viessman, «Chaudières à condensation Vitocrossal 200,» 2012.

[53] MTES, «Référentiel "Energie-Carbone" pour les bâtiments neufs. Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs,» 2017.

[54] ADEME, «L'exercice de prospective de l'ADEME "Vision 2030-2050",» 2012.

[55] E. Igos et E. Benetto, «Les différentes sources d'incertitudes en ACV, leurs modes de calcul et impacts sur l'inteprétation - guide pratique,» SCORE LCA, 2014.

Index des tableaux et figures

Tableaux [(i)]

Tableau 3-1 : Synthèse des cas d'étude de réseaux urbains 19
Tableau 3-2 : Synthèse des cas d'étude industriels 20
Tableau 3-3 : Rigueur climatique nationale (source : calcul SDES d'après les données Insee et Météo France) de 2000 à 2009 37
Tableau 3-4 : Rigueur climatique (source : calcul SDES d'après les données Insee et Météo France) de 2010 à 2017 37
Tableau 3-5 : Exemple de répartition des consommations 41
Tableau 3-6 : Indicateurs d'impacts environnementaux midpoint sélectionnés 50
Tableau 3-7 : Indicateurs d'impacts environnementaux endpoint sélectionnés 51
Tableau 3-8 : Correspondance entre les indicateurs utilisés au niveau midpoint et endpoint 52
Tableau 3-9 : Couverture solaire obtenue, en fonction du nombre de sondes et du nombre de panneaux 71
Tableau 4-1 : Description des hypothèses générales relatives au transport 94
Tableau 4-2 : Mutualisation des modèles d'inventaire de cycle de vie pour différents cas d'étude 97
Tableau 4-3 : Composition matière des différents systèmes modélisés 101
Tableau 4-4 : Coefficients utilisés pour la Circular Footprint Formula, par matériau 108
Tableau 4-5 : Qualité des données pour le S1-RC2 117
Tableau 4-6 : Qualité des données pour le S1-Cref 120
Tableau 4-7 : Qualité des données pour le S1-Dref1 122
Tableau 4-8 : Qualité des données pour le S1-Dref2 124
Tableau 4-9 : Qualité des données pour le S2-RC 130
Tableau 4-10 : Qualité des données pour le S2-Cref 134
Tableau 4-11 : Qualité des données pour le S2-Dref1 137
Tableau 4-12 : Qualité des données pour le S2-Dref2 139
Tableau 4-13 : Qualité des données pour le S3-RC 144
Tableau 4-14 : Qualité des données pour le S3-Cref 148
Tableau 4-15 : Qualité des données pour le S3-Dref 150
Tableau 4-16 : Qualité des données pour le S4-RC 155
Tableau 4-17 : Qualité des données pour le S4-Cref 158
Tableau 4-18 : Qualité des données pour le S4-Dref1 160
Tableau 4-19 : Qualité des données pour le S4-Dref2 163
Tableau 4-20 : Qualité des données pour le S5-R 166
Tableau 4-21 : Qualité des données pour le S5-Cref 169
Tableau 4-22 : Qualité des données pour le S6-R 172
Tableau 4-23 : Qualité des données pour le S6-Créf 174
Tableau 4-24 : Qualité des données pour le S7-R 177
Tableau 4-25 : Qualité des données pour le S7-Créf 179
Tableau 4-26 : Qualité des données pour le S8-R 183
Tableau 4-27 : Qualité des données pour le S8-Créf 187
Tableau 4-28 : Qualité des données pour le S9-R 190
Tableau 4-29 : Qualité des données pour le S9-Créf 193
Tableau 4-30 : Qualité des données pour le S10-R 196
Tableau 4-31 : Qualité des données pour le S10-Créf 199
Tableau 4-32 : Qualité des données pour le scénario S11-RC 204
Tableau 4-33 : Qualité des données pour le scénario S11-Créf 207
Tableau 4-34 : Qualité des données pour le scénario S11-Dréf 209
Tableau 5-1 : Cas d'étude 1 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 212
Tableau 5-2 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 215
Tableau 5-3 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 217
Tableau 5-4 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 219
Tableau 5-5 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 220

Tableau 5-6 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 222
Tableau 5-7 : Cas d'étude 2 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 227
Tableau 5-8 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 230
Tableau 5-9 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 231
Tableau 5-10 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 233
Tableau 5-11 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 234
Tableau 5-12 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques. 236
Tableau 5-13 : Cas d'étude 3 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 240
Tableau 5-14 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 243
Tableau 5-15 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 244
Tableau 5-16 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur toxicité humaine, effets non-cancérogènes 246
Tableau 5-17 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 247
Tableau 5-18 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 249
Tableau 5-19 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 250
Tableau 5-20 : Cas d'étude 4 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 253
Tableau 5-21 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 256
Tableau 5-22 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes 258
Tableau 5-23 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines 260
Tableau 5-24 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur d'épuisement des ressources énergétiques 262
Tableau 5-25 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques 263
Tableau 5-26 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de contribution sur les différents indicateurs 265
Tableau 5-27 : Cas d'étude 5 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 268
Tableau 5-28 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 271
Tableau 5-29 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 272
Tableau 5-30 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines 273
Tableau 5-31 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes 274
Tableau 5-32 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de ressources énergétiques 274
Tableau 5-33 : Cas d'étude 5 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques 275
Tableau 5-34 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 278
Tableau 5-35 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts d'acidification terrestre et d'eau douce 281
Tableau 5-36 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de particules fines 282
Tableau 5-37 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques 282
Tableau 5-38 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de ressources minérales et métalliques 283
Tableau 5-39 : Synthèse des contributions dans le cas d'étude 6 284
Tableau 5-40 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 286

Tableau 5-41 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de changement climatique 288
Tableau 5-42 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce 289
Tableau 5-43 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur particules fines 290
Tableau 5-44 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques 291
Tableau 5-45 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques 292
Tableau 5-46 : Synthèse des contributions dans le cas d'étude 7 293
Tableau 5-47 : Cas d'étude 8 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 296
Tableau 5-48 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 298
Tableau 5-49 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines . 299
Tableau 5-50 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 300
Tableau 5-51 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 301
Tableau 5-52 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 302
Tableau 5-53 : Cas d'étude 10 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 311
Tableau 5-54 : Cas d'étude 11 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 317
Tableau 5-55 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 319
Tableau 5-56 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 321
Tableau 5-57 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 322
Tableau 5-58 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 323
Tableau 6-1 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 331
Tableau 6-2 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint 337
Tableau 6-3 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la conductivité du sol sur les indicateurs midpoint 341
Tableau 6-4 : Cas d'étude 1 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés 343
Tableau 6-5 : Cas d'étude 1 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 344
Tableau 6-6 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 346
Tableau 6-7 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint 352
Tableau 6-8 : Cas d'étude 2 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés 357
Tableau 6-9 : Cas d'étude 2 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 358
Tableau 6-10 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 360
Tableau 6-11 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint 366
Tableau 6-12 : Cas d'étude 3 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés 370
Tableau 6-13 : Cas d'étude 3 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la valeur du facteur B 371
Tableau 6-14 : Cas d'étude 3 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 376
Tableau 6-15 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 378

Tableau 6-16 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité de la couverture solaire sur les indicateurs midpoint 382
Tableau 6-17 : Cas d'étude 4 : Résultats d'analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur les indicateurs midpoint 387
Tableau 6-18 : Cas d'étude 4 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 391
Tableau 6-19 : Cas d'étude 5 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 392
Tableau 6-20 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la valeur du facteur B 397
Tableau 6-21 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint concernés de l'analyse de sensibilité sur la nature du réfrigérant 402
Tableau 6-22 : Consommations électriques et d'énergie fatale des analyses de sensibilités à +/- 2°C de la température de consigne 403
Tableau 6-23 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température d'approvisionnement 404
Tableau 6-24 : Consommation électrique et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de la source fatale 408
Tableau 6-25 : Cas d'étude 5 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température de l'eau issue de source fatale 409
Tableau 6-26 : Cas d'étude 5 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 414
Tableau 6-27 : Cas d'étude 6 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur le mix électrique 415
Tableau 6-28 : Consommation électrique et de gaz des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée 419
Tableau 6-29 : Cas d'étude 6 : Résultats sur les indicateurs midpoint de l'analyse de sensibilité sur la température de l'eau approvisionnée 420
Tableau 6-30 : Cas d'étude 6 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 423
Tableau 6-31 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 424
Tableau 6-32 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité du coefficient d'allocation énergétique B sur les indicateurs midpoint 428
Tableau 6-33 : Consommation électrique, de gaz et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée 432
Tableau 6-34 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les indicateurs midpoint 432
Tableau 6-35 : Consommation électrique, de gaz et d'énergie fatale des analyses de sensibilité pour la température de la source fatale 436
Tableau 6-36 : Cas d'étude 7 : Résultats des analyses de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur les indicateurs midpoint 437
Tableau 6-37 : Cas d'étude 7 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 441
Tableau 6-38 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 441
Tableau 6-39 : Consommation électrique et de gaz des analyses de sensibilité pour la température de l'eau approvisionnée 446
Tableau 6-40 : Cas d'étude 8 : Résultats d'analyse de sensibilité de la température de l'eau sur les indicateurs midpoint 446
Tableau 6-41 : Cas d'étude 8 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 451
Tableau 6-42 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 451
Tableau 6-43 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité de la couverture solaire sur les indicateurs midpoint 454
Tableau 6-44 : Cas d'étude 9 : Taux de recyclage des métaux en fin de vie 457
Tableau 6-45 : Cas d'étude 9 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur les indicateurs midpoint 457

Tableau 6-46 : Cas d'étude 9 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 460
Tableau 6-47 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 461
Tableau 6-48 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de couverture solaire sur les indicateurs midpoint 464
Tableau 6-49 : Cas d'étude 10 : Taux de recyclage des métaux en fin de vie 466
Tableau 6-50 : Cas d'étude 10 : Résultats des analyses de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur les indicateurs midpoint 467
Tableau 6-51 : Cas d'étude 10 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 469
Tableau 6-52 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de sensibilité du mix électrique sur les indicateurs midpoint 470
Tableau 6-53 : Cas d'étude 11 : Résultats d'analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur les indicateurs midpoint concernés 474
Tableau 6-54 : Cas d'étude 11 : Tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios 475
Tableau 7-1 : Incertitude modélisée pour les paramètres d'entrées du modèle 477
Tableau 8-1 : Procédés ecoinvent utilisés pour la production 547
Tableau 8-2 : Procédés ecoinvent utilisés pour la mise en forme 548
Tableau 8-3 : Procédés ecoinvent utilisés pour le transport 549
Tableau 8-4 : Autres procédés ecoinvent utilisés pour les inventaires matières 549
Tableau 8-5 : Procédés ecoinvent utilisés pour l'inventaire énergie 549
Tableau 8-6 : Valeurs absolues par kWh des différents mix utilisés pour les différents impacts environnementaux 552
Tableau 8-7 : Source majoritaire d'impact du mix le plus impactant par catégorie d'impact 552

Figures[(i)]

Figure 2-1 : Bouquet énergétique et secteurs de livraison pour les réseaux de chaleur français en 2018 [4] 9
Figure 2-2 : Secteurs de livraison de froid par les réseaux de froids français en 2018 [4] 9
Figure 2-3 : Prévisions d'énergie à livrer par réseau de chaleur et part produite par des énergies renouvelables et de récupération [3] 10
Figure 2-4 : Objectifs de développement des réseaux de froid en France [3] 11
Figure 3-1 : Principe d'une pompe à chaleur sur sonde géothermique 21
Figure 3-2 : Schéma d'une sonde géothermique 23
Figure 3-3 : Schéma d'une pompe à chaleur sur aquifère 23
Figure 3-4 : Schéma d'un puits de prélèvement et de réinjection dans la nappe phréatique 24
Figure 3-5 : Schéma d'une pompe à chaleur aérothermique 25
Figure 3-6 : Schéma groupe froid à compression 26
Figure 3-7 : Schéma d'un groupe à absorption 28
Figure 3-8 : Schéma d'une machine à absorption simple effet SARC 29
Figure 3-9 : Schéma d'une machine à absorption double effet DEAHT 29
Figure 3-10 : Schéma d'une thermo-frigo-pompe 31
Figure 3-11 : Schéma de la centrale solaire Big Solar Graz (Autriche) (SDHp2m) 33
Figure 3-12 : Comparaison des capteurs solaires thermiques 33
Figure 3-13 : Schéma d'une chaudière à condensation 34
Figure 3-14 : Carte des zones climatiques au sens de la RT2012 (coefficient CEP en kWh/m2/an) 36
Figure 3-15 : Carte de l'ensoleillement extrait de Solargis 36
Figure 3-16 : Evolution de l'indice de rigueur climatique en France 36
Figure 3-17 : Classement CE1 CE2 selon la RT2012 39
Figure 3-18 : Diagramme général des frontières du système 44
Figure 3-19 : Système S1-RC1 : Schéma descriptif 55
Figure 3-20 : Système S1-RC2 : Schéma descriptif 57
Figure 3-21 : Système S1-Cref : Schéma descriptif 58
Figure 3-22 : Système S1-Dref1 : Schéma descriptif 58
Figure 3-23 : Système S1-Dref2 : Schéma descriptif 59
Figure 3-24 : S2-RC Schéma descriptif 61

Figure 3-25 : Système S2-Cref : Schéma descriptif 63
Figure 3-26 : Système S2-Dref1 : Schéma type (3 systèmes représentés, 20 modélisés) 64
Figure 3-27 : S2-Dref2 : Schéma type 65
Figure 3-28 : S3-RC : Schéma descriptif 67
Figure 3-29 : Système S3-Cref : Schéma type 68
Figure 3-30 : Système S3-Dref : Schéma type 69
Figure 3-31 : Schéma simplifié de l'installation de Drake Landing Solar Community 70
Figure 3-32 - Comparaison des résultats simulés sous TRNSYS et des résultats de régression pour la couverture solaire en fonction du nombre de sondes et du nombre de panneaux 72
Figure 3-33 : Système S4-Cref : Schéma type 73
Figure 3-34 : Système S4-Dref1 : Schéma type 74
Figure 3-35 : Système S4-Dref2 : Schéma type 75
Figure 3-36 : Système S5-R : Schéma type 76
Figure 3-37 : Système S5-Cref : Schéma type 77
Figure 3-38 : Système S6-R : Schéma type 78
Figure 3-39 : Système S6-Cref : Schéma type 78
Figure 3-40 : Système S7-R : Schéma type 80
Figure 3-41 : Système S7-Cref : Schéma type 81
Figure 3-42 : Système S8-R : Schéma type 82
Figure 3-43 : Système S8-Cref : Schéma type 83
Figure 3-44 : Système S9-R : Schéma type 84
Figure 3-45 : Système S9-Cref : Schéma type 85
Figure 3-46 : Système S10-R : Schéma type 87
Figure 3-47 : Système S10-Cref : Schéma type 87
Figure 3-48 : Système S11-RC : Schéma descriptif 90
Figure 3-49 : Système S11-Cref : Schéma descriptif 92
Figure 3-50 : Système S11-Dref : Schéma descriptif 93
Figure 4-1 : Mix électrique 2017 - répartition par filières 95
Figure 4-2 : Mix électrique français 2019 96
Figure 4-3 : Illustration de l'adaptation des procédés de formage à la modélisation CFF 97
Figure 4-4 : Inventaire de production du LiBr 101
Figure 4-5 : Illustration de la modélisation en CFF pour le cuivre 104
Figure 4-6 : Histogramme de production pour le système S1-RC1 (bleu = PAC, orange = chaudière) 112
Figure 4-7 : Mix électrique spécifique au système S1-RC1 112
Figure 4-8 : Histogramme de production pour le système S1-RC2 (bleu = PAC, orange = chaudière) 116
Figure 4-9 : Mix électrique spécifique au système S1-RC2 116
Figure 4-10 : Histogramme de production pour le système S1-Créf 119
Figure 4-11 : Histogramme de production pour le système S1-Dref1 121
Figure 4-12 : Histogramme de production pour le système S1-Dref2 (bleu = PAC, orange = résistances électriques) 123
Figure 4-13 : Mix électrique spécifique au système S1-Dref2 123
Figure 4-14 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S2-RC (bleu = TFP, orange= gaz naturel) 127
Figure 4-15 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-RC (bleu=TFP, orange=groupe froid) 128
Figure 4-16 : Mix électriques des thermo-frigo-pompes (en haut) et des groupes froids (en bas) du scénario S2-RC 129
Figure 4-17 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S2-Créf 133
Figure 4-18 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-Créf 133
Figure 4-19 : Mix électrique du groupe froid dans le scénario S2-Cref 133
Figure 4-20 : Histogramme de production de chaleur des chaudières individuel au gaz pour le scénario S2-Dref1 136
Figure 4-21 : Histogramme de production de froid pour le scénario S2-Dref1 136
Figure 4-22 : Mix électrique des groupes froids dans le scénario S2-Dref1 136
Figure 4-23 : Histogramme de production de chaleur de la TFP individuelle du scénario S2-Dref2 138
Figure 4-24 : Histogramme de production de froid d'une TFP individuelle du scénario S2-Dref2 139
Figure 4-25 : Mix électrique pour les TFP individuelles du scénario Dréf2 139
Figure 4-26 : Histogramme de répartition de la production de froid dans le scénario S3-RC 142

Figure 4-27 : Mix électrique des groupes froids absorption (en haut) et compression (en bas) dans le scénario S3-RC 143
Figure 4-28 : Histogramme de production de froid dans le scénario S3-Cref 146
Figure 4-29 : Mix électrique du groupe froid dans le scénario S3-Cref 147
Figure 4-30 : Histogramme de production de chaleur des groupes froids individuels dans le scénario S3-Dref 150
Figure 31 : Mix électrique des groupes froids individuels dans le scénario S3-Cref 150
Figure 4-32 - Evolution de la couverture solaire avec le temps pendant 10 ans pour le scénario S4-RC 154
Figure 4-33 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-RC (orange = production solaire et bleu = complément gaz) 154
Figure 4-34 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-Créf 157
Figure 4-35 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S4-Dréf 1 159
Figure 4-36 : Histogramme de production de la chaleur pour le scénario S4-Dréf 2 162
Figure 4-37 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S5-R 165
Figure 4-38 : Histogramme de production de froid pour le scénario S5-Créf 168
Figure 4-39 : Histogramme de production de chaleur de la PAC du scénario S6-R 171
Figure 4-40 : Histogramme de production de chaleur de la chaudière gaz du scénario S6-Créf 173
Figure 4-41 : Histogramme de production de chaleur de la PAC dans le scénario S7-R 176
Figure 4-42 : Histogramme de production de chaleur pour le scénario S7-Créf 178
Figure 4-43 : Histogramme de production de la chaleur de la TFP dans le scénario S8-R d'une journée type 181
Figure 4-44 : Histogramme de production de froid de la TFP dans le scénario S8-R 181
Figure 4-45 : Mix électrique spécifique pour la TFP du scénario S8-R 182
Figure 4-46 : Histogramme de production de chaleur de la chaudière dans le scénario S8-Créf d'une journée type 185
Figure 4-47 : Histogramme de production du groupe froid dans le scénario S8-Créf 185
Figure 4-48 : Mix électrique spécifique du groupe froid dans le scénario S8-Créf 186
Figure 4-49 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, orange=solaire) pour le scénario S9-R 189
Figure 4-50 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, rouge=solaire) pour le scénario S9-Créf 192
Figure 4-51 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, orange=solaire) pour le scénario S10-R 195
Figure 4-52 : Histogramme de production de chaleur (bleu=chaudière, rouge=solaire) pour le scénario S10-Cref 198
Figure 4-53 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production des PAC (en bleu) et des chaudières (en orange) dans le scénario S11-RC 202
Figure 4-54 : Mix électrique spécifique de la PAC dans le scénario S11-RC 203
Figure 4-55 : Mix électrique spécifique des pompes dans le scénario S11-RC 203
Figure 4-56 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production des chaudières dans le scénario S11-Créf 206
Figure 4-57 : Cas d'étude 11 : Histogramme de production de la chaudière dans le scénario S11-Dréf 208
Figure 5-1 : Procédure d'analyse des résultats 210
Figure 5-2 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages à la santé humaine 213
Figure 5-3 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 214
Figure 5-4 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 214
Figure 5-5 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 215
Figure 5-6 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 216
Figure 5-7 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 218
Figure 5-8 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 220
Figure 5-9 : Cas d'étude 1 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 221
Figure 5-10 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative 224
Figure 5-11 : Cas d'étude 1 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 225
Figure 5-12 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages à la santé humaine 228
Figure 5-13 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 228
Figure 5-14 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 229

Figure 5-15 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 231
Figure 5-16 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 232
Figure 5-17 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 234
Figure 5-18 : Cas d'étude 2 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 235
Figure 5-19 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative... 238
Figure 5-20 : Cas d'étude 2 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 238
Figure 5-21 : Cas d'étude 3 : Contributions aux dommages à la santé humaine 241
Figure 5-22 : Cas d'étude 3 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 241
Figure 5-23 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 242
Figure 5-24 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 244
Figure 5-25 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur toxicité humaine, effets non-cancérogènes 245
Figure 5-26 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 247
Figure 5-27 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 248
Figure 5-28 : Cas d'étude 3 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 249
Figure 5-29 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages à la santé humaine 254
Figure 5-30 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 254
Figure 5-31 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 255
Figure 5-32 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes 257
Figure 5-33 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur des particules fines 259
Figure 5-34 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources énergétiques 261
Figure 5-35 : Cas d'étude 4 : Analyse de contribution sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques 263
Figure 5-36 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative... 266
Figure 5-37 : Cas d'étude 4 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 266
Figure 5-38 : Cas d'étude 5 : Impact endpoint sur la santé humaine 269
Figure 5-39 : Cas d'étude 5 : Impact endpoint sur les écosystèmes 269
Figure 5-40 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts du changement climatique 270
Figure 5-41 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'acidification terrestre et eau douce 271
Figure 5-42 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des particules fines 272
Figure 5-43 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de toxicité humaine, effets cancérogènes 273
Figure 5-44 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des ressources énergétiques 274
Figure 5-45 : Cas d'étude 5 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts des ressources minérales et métalliques 275
Figure 5-46 : Cas d'étude 5 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative... 276
Figure 5-47 : Cas d'étude 6 : Impact endpoint sur la santé humaine 279
Figure 5-48 : Cas d'étude 6 : Impact endpoint sur les écosystèmes 279
Figure 5-49 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts du changement climatique 280
Figure 5-50 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'acidification terrestre et d'eau douce 281
Figure 5-51 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de particules fines 281
Figure 5-52 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de ressources énergétiques 282
Figure 5-53 : Cas d'étude 6 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques 283
Figure 5-54 : Cas d'étude 6 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative... 284
Figure 5-55 : Cas d'étude 7 : Impact endpoint sur la santé humaine 287
Figure 5-56 : Cas d'étude 7 : Impact endpoint sur les écosystèmes 287

Figure 5-57 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur de changement climatique 288
Figure 5-58 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur d'acidification terrestre et eau douce 289
Figure 5-59 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur particules fines 290
Figure 5-60 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources énergétiques 291
Figure 5-61 : Cas d'étude 7 : Contribution des étapes de cycle de vie aux impacts de l'indicateur des ressources minérales et métalliques 292
Figure 5-62 : Cas d'étude 7 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative 294
Figure 5-63 : Cas d'étude 7 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 294
Figure 5-64 : Cas d'étude 8 : Contributions aux dommages à la santé humaine 297
Figure 5-65 : Cas d'étude 8 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 297
Figure 5-66 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 298
Figure 5-67 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 299
Figure 5-68 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 300
Figure 5-69 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 301
Figure 5-70 : Cas d'étude 8 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 302
Figure 5-71 : Cas d'étude 9 : Résultats d'impact sur les indicateurs midpoint 304
Figure 5-72 : Cas d'étude 9 : Contribution aux dommages sur la santé humaine 305
Figure 5-73 : Cas d'étude 9 : Contribution aux dommages sur les écosystèmes 305
Figure 5-74 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur du changement climatique 306
Figure 5-75 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources énergétiques 307
Figure 5-76 : Cas d'étude 9 : Analyse de contribution sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques 307
Figure 5-77 : Cas d'étude 9 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative 309
Figure 5-78 : Cas d'étude 9 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 309
Figure 5-79 : Cas d'étude 10 : contribution des indicateurs midpoint sur la santé humaine 312
Figure 5-80 : Cas d'étude 10 : contribution des indicateurs midpoint sur les écosystèmes 312
Figure 5-81 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur du changement climatique 313
Figure 5-82 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 314
Figure 5-83 : Cas d'étude 10 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 314
Figure 5-84 : Cas d'étude 10 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative 316
Figure 5-85 : Cas d'étude 10 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 316
Figure 5-86 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages à la santé humaine 318
Figure 5-87 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages aux écosystèmes 318
Figure 5-88 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique 319
Figure 5-89 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur particules fines 320
Figure 5-90 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources énergétiques 322
Figure 5-91 : Cas d'étude 11 : Analyse de contribution sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 323
Figure 5-92 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages à la santé humaine en valeur relative 325
Figure 5-93 : Cas d'étude 11 : Contributions aux dommages aux écosystèmes en valeur relative 326
Figure 6-1 : Répartition de la production entre les filières pour le mix par usage chauffage résidentiel 328
Figure 6-2 : Répartition de la production entre les filières pour le mix par usage Industrie utilisé également pour l'usage climatisation 329
Figure 6-3 : Répartition de la production entre les filières pour le mix ADEME 2050 330
Figure 6-4 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 332
Figure 6-5 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 333
Figure 6-6 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 334
Figure 6-7 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques 335

Figure 6-8 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 335
Figure 6-9 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique 338
Figure 6-10 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines 338
Figure 6-11 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 339
Figure 6-12 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques 340
Figure 6-13 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 340
Figure 6-14 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité de la conductivité du sol sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 342
Figure 6-15 : Cas d'étude 1 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique 343
Figure 6-16 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 347
Figure 6-17 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 348
Figure 6-18 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 348
Figure 6-19 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques 349
Figure 6-20 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 350
Figure 6-21 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique 353
Figure 6-22 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines 354
Figure 6-23 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 354
Figure 6-24 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques 355
Figure 6-25 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 355
Figure 6-26 : Cas d'étude 2 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique 357
Figure 6-27 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 361
Figure 6-28 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur toxicité humaine non-cancérogène 362
Figure 6-29 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 362
Figure 6-30 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 363
Figure 6-31 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques 364
Figure 6-32 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 364
Figure 6-33 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique 367
Figure 6-34 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines 368
Figure 6-35 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 368
Figure 6-36 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques 369
Figure 6-37 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 370

Figure 6-38 : Cas d'étude 3 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique 371
Figure 6-39 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur le changement climatique 372
Figure 6-40 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'acidification terrestre et eau douce 373
Figure 6-41 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur les particules fines 373
Figure 6-42 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur la toxicité humaine, effets non-cancérogènes 374
Figure 6-43 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources énergétiques 374
Figure 6-44 : Cas d'étude 3 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 375
Figure 6-45 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 379
Figure 6-46 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes 380
Figure 6-47 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 380
Figure 6-48 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques 381
Figure 6-49 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques 382
Figure 6-50 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur changement climatique 383
Figure 6-51 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes 384
Figure 6-52 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur particules fines 385
Figure 6-53 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques 385
Figure 6-54 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité de la couverture solaire sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques 386
Figure 6-55 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur changement climatique 388
Figure 6-56 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur toxicité humaine, effets cancérogènes 388
Figure 6-57 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur particules fines 389
Figure 6-58 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur épuisement des ressources énergétiques 389
Figure 6-59 : Cas d'étude 4 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux sur l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques 390
Figure 6-60 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 393
Figure 6-61 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 394
Figure 6-62 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines 394
Figure 6-63 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur de toxicité humaine, effets cancérogènes 395
Figure 6-64 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques 396
Figure 6-65 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et des métalliques 396
Figure 6-66 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur le changement climatique 398
Figure 6-67 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'acidification terrestre et eau douce 399
Figure 6-68 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur les particules fines 399
Figure 6-69 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur la toxicité humaine, effets cancérogènes 400

Figure 6-70 : Cas d’étude 5 : Analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources énergétiques 401
Figure 6-71 : Cas d’étude 5 : analyse de sensibilité du facteur B sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 402
Figure 6-72 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la nature du réfrigérant sur le changement climatique 403
Figure 6-73 : Cas d’étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur le changement climatique 404
Figure 6-74 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l’acidification terrestre et eau douce 405
Figure 6-75 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur les particules fines 406
Figure 6-76 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur la toxicité humaine, effets cancérogènes 406
Figure 6-77 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l'épuisement des ressources énergétiques 407
Figure 6-78 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température d'approvisionnement sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 408
Figure 6-79 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur le changement climatique 410
Figure 6-80 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'acidification terrestre et eau douce 410
Figure 6-81 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur les particules fines 411
Figure 6-82 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur la toxicité humaine, effets cancérogènes 412
Figure 6-83 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'épuisement des ressources énergétiques 412
Figure 6-84 : Cas d'étude 5 : analyse de sensibilité de la température de la chaleur fatale sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 413
Figure 6-85 : Cas d'étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur le changement climatique 416
Figure 6-86 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l’acidification terrestre et eau douce 416
Figure 6-87 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines 417
Figure 6-88 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques 418
Figure 6-89 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 418
Figure 6-90 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur le changement climatique 419
Figure 6-91 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur le changement climatique 421
Figure 6-92 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l’acidification terrestre et eau douce 421
Figure 6-93 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les particules fines 422
Figure 6-94 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources énergétiques 422
Figure 6-95 : Cas d’étude 6 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 423
Figure 6-96 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur le changement climatique 425
Figure 6-97 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'acidification terrestre et eau douce 426
Figure 6-98 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur les particules fines 426
Figure 6-99 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources énergétiques 427
Figure 6-100 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du mix électrique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 428
Figure 6-101 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur le changement climatique 429

Figure 6-102 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'acidification terrestre et eau douce 430
Figure 6-103 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur les particules fines 430
Figure 6-104 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'épuisement des ressources énergétiques 431
Figure 6-105 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité du coefficient B d'allocation énergétique sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 431
Figure 6-106 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur le changement climatique 433
Figure 6-107 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'acidification terrestre et eau douce 434
Figure 6-108 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur les particules fines 434
Figure 6-109 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources énergétiques 435
Figure 6-110 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau approvisionnée sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 436
Figure 6-111 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur le changement climatique 437
Figure 6-112 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'acidification terrestre et eau douce 438
Figure 6-113 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur les particules fines 439
Figure 6-114 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'épuisement des ressources énergétiques 439
Figure 6-115 : Cas d'étude 7 : analyse de sensibilité de la température de l'eau de la source fatale sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques 440
Figure 6-116 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 442
Figure 6-117 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 443
Figure 6-118 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 444
Figure 6-119 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques 444
Figure 6-120 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 445
Figure 6-121 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur changement climatique 447
Figure 6-122 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur particules fines 448
Figure 6-123 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur acidification terrestre et eau douce 449
Figure 6-124 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources énergétiques 449
Figure 6-125 : Cas d'étude 8 : Analyse de sensibilité de la température sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 450
Figure 6-126 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur du changement climatique 452
Figure 6-127 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources énergétiques 453
Figure 6-128 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques 453
Figure 6-129 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur changement climatique 455
Figure 6-130 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur de ressources énergétiques 456
Figure 6-131 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur de ressources minérales et métalliques 456

Figure 6-132 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur changement climatique 458
Figure 6-133 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur ressources énergétiques 459
Figure 6-134 : Cas d'étude 9 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 459
Figure 6-135 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur du changement climatique 462
Figure 6-136 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources énergétiques 462
Figure 6-137 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques 463
Figure 6-138 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur du changement climatique 465
Figure 6-139 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur des ressources énergétiques 465
Figure 6-140 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de couverture solaire sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques 466
Figure 6-141 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur du changement climatique 468
Figure 6-142 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur des ressources énergétiques 468
Figure 6-143 : Cas d'étude 10 : Analyse de sensibilité du taux de recyclage des panneaux solaires sur l'indicateur des ressources minérales et métalliques 469
Figure 6-144 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur changement climatique 471
Figure 6-145 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur particules fines 472
Figure 6-146 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources énergétiques 473
Figure 6-147 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du mix électrique sur l'indicateur ressources minérales et métalliques 473
Figure 6-148 : Cas d'étude 11 : Analyse de sensibilité du type de réfrigérant sur l'indicateur changement climatique 475
Figure 7-1 : Principe de « boîte à moustaches » pour la représentation des incertitudes. 478
Figure 7-2 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur changement climatique : résultats d'impact par système 480
Figure 7-3 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 481
Figure 7-4 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 482
Figure 7-5 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 483
Figure 7-6 : Cas d'étude 1 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratio des impacts entre S1-RC1 et S1-RC2 (droite) 484
Figure 7-7 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système 485
Figure 7-8 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 486
Figure 7-9 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système 487
Figure 7-10 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 488
Figure 7-11 : Cas d'étude 2 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 489
Figure 7-12 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système 490
Figure 7-13 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Toxicité humaine, effets non-cancérogènes : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 491

Figure 7-14 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)..... 492
Figure 7-15 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 493
Figure 7-16 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite) 494
Figure 7-17 : Cas d'étude 3 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts pour certains systèmes (droite)..... 495
Figure 7-18 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système 496
Figure 7-19 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système 497
Figure 7-20 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts (droite) 498
Figure 7-21 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système..... 499
Figure 7-22 : Cas d'étude 6 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système 500
Figure 7-23 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Changement climatique : résultats d'impact par système 501
Figure 7-24 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Acidification terrestre et eau douce : résultats d'impact par système (gauche) et ratios des impacts (droite)..... 502
Figure 7-25 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Particules fines : résultats d'impact par système 503
Figure 7-26 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Ressources énergétiques : résultats d'impact par système..... 504
Figure 7-27 : Cas d'étude 7 – Incertitude pour l'indicateur Ressources minérales et métalliques : résultats d'impact par système 505
Figure 8-1 : Impacts environnementaux des différents mix utilisés en comparaison au mix 2017 551

Sigles et acronymes

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
COP	Coefficient Of Performance
COTECH	Comité technique
DEAHT	Double Effect Absorption Heat
DJU	Degrés-jours unifiés
EER	Energy Efficiency Ratio
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
PCR	« *Product Category Rules* » ; Règles de définitions des Catégories de Produits.
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
SARC	Simple Absorption Refrigeration Cycle
SDHp2m	Solar District Heating from policy to market (réseau de chaleur urbain solaire de la politique au marché)
UIOM	Unité d'Incinération des Ordures Ménagères

Glossaire

Potentiel de réchauffement global : Capacité d'un gaz à effet de serre à influer sur le forçage radiatif, exprimée par rapport à une substance de référence (par exemple en unités équivalent CO_2) et à une certaine échéance (par exemple PRG 20, PRG 100 et PRG 500 désignent respectivement le PRG à 20, à 100 et à 500 ans). Il concerne la capacité à induire une modification de la température moyenne de la surface de la terre et de l'air et des changements subséquents des divers paramètres climatiques et de leurs effets, tels que la fréquence et l'intensité des tempêtes, l'intensité des précipitations et la fréquence des inondations, etc.

Appauvrissement de la couche d'ozone : Catégorie d'impact qui rend compte de la dégradation de l'ozone stratosphérique par les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone telles que les gaz chlorés et bromés à longue durée de vie (CFC, HCFC, halons).

Toxicité humaine – autre que cancer : Catégorie d'impact qui rend compte des effets préjudiciables à la santé humaine liés à l'absorption de substances toxiques par inhalation d'air, ingestion d'eau et/ou d'aliments ou pénétration cutanée, dans la mesure où ils sont liés à des effets autres que le cancer qui ne sont pas provoqués par des particules/des substances inorganiques affectant les voies respiratoires ou des rayonnements ionisants.

Toxicité humaine - cancer : Catégorie d'impact qui rend compte des effets préjudiciables à la santé humaine liés à l'absorption de substances toxiques par inhalation d'air, ingestion d'eau et/ou d'aliments ou pénétration cutanée, dans la mesure où ils sont liés au cancer.

Particules fines / substances inorganiques affectant les voies respiratoires : Catégorie d'impact qui rend compte des effets nocifs pour la santé humaine des émissions de particules (PM) et de leurs précurseurs (NOx, SOx, NH3).

Rayonnement ionisant, santé humaine : Catégorie d'impact qui représente les effets néfastes pour la santé humaine des rejets radioactifs.

Formation photochimique d'ozone : Catégorie d'impact qui rend compte de la formation d'ozone au niveau du sol, dans la troposphère, du fait de l'oxydation photochimique des composés organiques volatils (COV) et du monoxyde de carbone (CO) en présence d'oxydes d'azote (NOx) et sous l'effet du rayonnement solaire. En réagissant avec des substances inorganiques, l'ozone présente en concentrations élevées au niveau du sol, dans la troposphère, endommage la végétation, les voies respiratoires humaines et les matériaux synthétisés par l'homme.

Acidification : Catégorie d'impact qui désigne les effets des substances acidifiantes présentes dans l'environnement. Les émissions de NOx, de NH_3 et de SOx entraînent la libération d'ions hydrogène (H^+) lors de la minéralisation des gaz. Les protons contribuent à l'acidification des sols et de l'eau lorsqu'ils sont libérés à des endroits où le pouvoir tampon est faible, provoquant une dégradation des forêts et une acidification des lacs.

Eutrophisation : Les substances nutritives (essentiellement azote et phosphore) provenant du déversement des égouts et des terres agricoles fertilisées accélèrent la croissance des algues et des autres végétaux aquatiques. La dégradation des matières organiques consomme de l'oxygène, ce qui entraîne un déficit d'oxygène et provoque parfois la mort des poissons. L'eutrophisation convertit la quantité de substances émises dans une mesure courante, exprimée comme la quantité d'oxygène nécessaire pour dégrader de la biomasse morte.

Écotoxicité : Catégorie d'impact de l'empreinte environnementale qui couvre les impacts toxiques sur un écosystème qui portent atteinte à certaines espèces et modifient la structure et la fonction de l'écosystème. L'écotoxicité est le résultat de multiples mécanismes toxicologiques distincts dus à la libération de substances ayant un effet direct sur la santé de l'écosystème.

Utilisation des terres : Catégorie d'impact liée à l'utilisation (occupation) et à la conversion (transformation) des terres par des activités telles que l'agriculture, les routes, le logement, l'exploitation minière, etc. L'occupation des terres prend en considération les effets de l'utilisation des terres, la superficie concernée et la durée de l'occupation (modifications de la qualité multipliées par la superficie et la durée). La transformation des terres concerne l'ampleur des changements dans la propriété foncière et la superficie concernée (modifications de la qualité multipliées par la superficie).

Épuisement des ressources : Catégorie d'impact qui rend compte de l'utilisation des ressources naturelles, renouvelables ou non, biotiques ou abiotiques.

Données primaires / Données de premier plan / Données brutes : Données spécifiques au système étudié. Il s'agit en général d'une quantité, d'une masse, d'un volume, etc…

Données d'inventaire / Données d'arrière-plan / Données génériques : Données d'inventaires de cycle de vie issues de bases de données. Elles permettent par exemple de calculer les impacts environnementaux associés à la production d'une quantité donnée d'un produit.

Source froide : Milieu dans lequel une pompe à chaleur prélève des calories.

Source chaude : Milieu dans lequel une pompe à chaleur apporte des calories

Indice de rigueur climatique : Rapport entre un indicateur de climat observé et un indicateur de climat de référence (période trentenaire). Cet indicateur est constitué par des degrés jours unifiés (écart journalier entre la température observée et 17°C). Par convention le degré jour unifié est égal à zéro si la température observée est supérieure ou égale à la température de référence.

Système d'appoint : Système indépendant utilisé en fonctionnement normal pour compléter la production de chaleur (ou de froid) du système central, lorsque celui-ci est à production maximale.

Système de secours : Système indépendant utilisé en cas de panne du système central pour éviter une rupture de l'approvisionnement en chaleur (ou en froid).

ANNEXE 1 : Liste des procédés ecoinvent utilisés

Tableau 8-1 : Procédés ecoinvent utilisés pour la production

	Production primaire	Production secondaire	Incinération	Décharge
Inox	Steel, chromium steel 18/8 {RER}| steel production, converter, chromium steel 18/8 | Cut-off, S	Steel, chromium steel 18/8 {RER}| steel production, electric, chromium steel 18/8 | Cut-off, S	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Acier carbone	Pig iron {GLO}| market for | Cut-off, S	Iron scrap, sorted, pressed {GLO}| market for | Cut-off, S	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Acier	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, converter, low-alloyed | Cut-off, S	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, S	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Cuivre	Copper {RER}| production, primary | Cut-off, S	Copper {FR}| treatment of scrap by electrolytic refining | Cut-off, U	Scrap copper {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste aluminium {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
Aluminium	Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA}| production | Cut-off, S	Aluminium, wrought alloy {FR}| treatment of aluminium scrap, new, at remelter | Cut-off, U	Aluminium in car shredder residue {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste aluminium {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
Fonte	Pig iron {GLO}| market for | Cut-off, S	Iron scrap, sorted, pressed {GLO}| market for | Cut-off, S	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Béton	Concrete block {GLO}| market for | Cut-off, S	/	/	Waste concrete {CH}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
PE	Polyethylene, high density, granulate {RER}| production | Cut-off, S	Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH}| polyethylene production, high density, granulate, recycled | Cut-off, U	Waste polyethylene {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U	Waste polyethylene {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
PP	Polypropylene, granulate {RER}| production | Cut-off, S	Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH}| polyethylene production, high density, granulate, recycled | Cut-off, U	Waste polypropylene {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste polypropylene {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
PU	Polyurethane, rigid foam {RER}| production | Cut-off, S	Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH}| polyethylene production, high density, granulate, recycled | Cut-off, U	Waste polyurethane {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste polyurethane {CH}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
PS	Polystyrene, general purpose {RER}| production | Cut-off, S	Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH}| polyethylene production, high density, granulate, recycled | Cut-off, U	Waste polystyrene {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste polystyrene {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
Rubber	Synthetic rubber {RER}| production | Cut-off, S	/	Waste rubber, unspecified {RoW}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, S	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
Glycol	Propylene glycol, liquid {RER}| production | Cut-off, S	/	Hazardous waste, for incineration {CH}| market for hazardous waste, for incineration | Cut-off, S	/
Eau	Tap water {CH}| market for | Cut-off, S			

	Production primaire	Production secondaire	Incinération	Décharge
PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RER}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, S	/	Waste polyvinylchloride {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, S	Waste polyvinylchloride {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S
Lubrifiant	Lubricating oil {RER}| production | Cut-off, S	/	Waste mineral oil {CH}| treatment of, hazardous waste incineration | Cut-off, S	Hazardous waste, for underground deposit {GLO}| market for | Cut-off, S
Laine de roche	Stone wool {CH}| stone wool production | Cut-off, S	/	Municipal solid waste {FR}| treatment of, incineration | Cut-off, S	Inert waste, for final disposal {CH}| treatment of inert waste, inert material landfill | Cut-off, S
Acier galvanisé	Steel, chromium steel 18/8 {RER}| steel production, converter, chromium steel 18/8 | Cut-off, S	Steel, chromium steel 18/8 {RER}| steel production, electric, chromium steel 18/8 | Cut-off, S	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Réfrigérant R1234ze	Refrigerant R134a {RER}| production | Cut-off, S	/	Used refrigerant R134a {GLO}| treatment of used refrigerant R134a, final disposal | Cut-off, S	/
Réfrigérant Ammoniac	Ammonia, liquid {RER}| market for | Cut-off, S	/	Hazardous waste, for incineration {CH}| treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration | Cut-off, S	/
Réfrigérant LiBr	Ethylene glycol {GLO}| market for | Cut-off, U	/	Hazardous waste, for incineration {CH}| treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration | Cut-off, S	/
	Lithium hydroxide {GLO}| market for | Cut-off, U	/		/
	Bromine {GLO}| market for | Cut-off, U	/		/
	Tap water {RER}| market group for | Cut-off, U	/		/
Verre	Flat glass, uncoated {RER}| production | Cut-off, S	Packaging glass, white {CH}| production | Cut-off, S	Waste glass {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Waste glass {GLO}| treatment of waste glass, sanitary landfill | Cut-off, S
Nickel	Nickel, 99.5% {GLO}| nickel mine operation, sulfidic ore | Cut-off, S	Nickel, 99.5% {FR}| treatment of metal part of electronics scrap, in blister-copper, by electrolytic refining | Cut-off, U	Scrap steel {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, S	Scrap steel {RoW}| treatment of, inert material landfill | Cut-off, S
Packaging	Corrugated board box {RER}| production | Cut-off, U	/	Waste paperboard {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, S

Tableau 8-2 : Procédés ecoinvent utilisés pour la mise en forme

Manufacturing de métaux	Metal working, average for aluminium product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S
	Metal working, average for chromium steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S
	Metal working, average for copper product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S
	Metal working, average for metal product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S
	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, S
Manufacturing de plastiques	Injection moulding {RER}| processing | Cut-off, S

Tableau 8-3 : Procédés ecoinvent utilisés pour le transport

Transport	Transport, freight train {Europe without Switzerland}| market for | Cut-off, S
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | Cut-off, S
	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}| market for | Cut-off, S

Tableau 8-4 : Autres procédés ecoinvent utilisés pour les inventaires matières

Autres	Activated bentonite {DE}| production | Cut-off, S
	Computer, laptop {GLO}| market for | Cut-off, S
	Diesel, burned in building machine {GLO}| market for | Cut-off, S
	Drilling waste {CH}| treatment of, residual material landfill | Cut-off, S
	Excavation, skid-steer loader {GLO}| market for | Cut-off, S
	Benzal chloride {RER}| production | Cut-off, U
	Cocamide diethanolamine {RER}| cocamide diethanolamine production | Cut-off, S
	Sodium chloride, powder {GLO}| market for | Cut-off, U
	Carboxymethyl cellulose, powder {GLO}| market for | Cut-off, U
	Sodium bicarbonate {GLO}| market for sodium bicarbonate | Cut-off, U
	Gravel, round {CH}| market for gravel, round | Cut-off, S
	Refractory, fireclay, packed {GLO}| market for | Cut-off, S
	Silica sand {GLO}| market for | Cut-off, S
	Sand {GLO}| market for | Cut-off, S
	Sulfuric acid {RER}| market for sulfuric acid | Cut-off, S

Tableau 8-5 : Procédés ecoinvent utilisés pour l'inventaire énergie

Mix électrique	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hard coal | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hydro, reservoir, alpine region | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, hydro, run-of-river | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, natural gas, combined cycle power plant | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, natural gas, conventional power plant | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, nuclear, pressure water reactor | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, oil | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, <1MW turbine, onshore | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, >3MW turbine, onshore | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| heat and power co-generation, biogas, gas engine | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| heat and power co-generation, oil | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| import from BE | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| import from CH | Cut-off, S

	Electricity, high voltage {FR}| import from DE | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| import from ES | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| import from GB | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| import from IT | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| market for | Cut-off, S
	Electricity, high voltage {FR}| treatment of blast furnace gas, in power plant | Cut-off, S
	Electricity, low voltage {FR}| electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted | Cut-off, S
	Electricity, low voltage {FR}| electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted | Cut-off, S
	Electricity, low voltage {FR}| electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si | Cut-off, S
	Electricity, low voltage {FR}| market for | Cut-off, S
	Electricity, medium voltage {FR}| electricity, from municipal waste incineration to generic market for | Cut-off, S
	Heat, central or small-scale, natural gas {CH}| market for heat, central or small-scale, natural gas | Cut-off, S
	Heat, district or industrial, natural gas {RER}| market group for | Cut-off, S
	Heat, district or industrial, other than natural gas {RER}| market group for | Cut-off, S
	Pipeline, natural gas, low pressure distribution network {GLO}| market for | Cut-off, S
	Transmission network, electricity, high voltage {GLO}| market for | Cut-off, S
	Transmission network, electricity, medium voltage {GLO}| market for | Cut-off, S
	Transmission network, long-distance {GLO}| market for | Cut-off, S
	Natural gas, low pressure {FR}| market for | Cut-off, U
	Natural gas, high pressure {FR}| market for | Cut-off, U

ANNEXE 2 : Comparaison des impacts des mix électriques utilisés pour les analyses de sensibilité

Les impacts environnementaux de nombreux systèmes comparés dans le cadre de cette étude sont fortement influencés par ceux du mix électrique utilisé. Dans le cadre des analyses de sensibilité, nous avons utilisés plusieurs mix électriques. La figure ci-dessous compare les impacts des différents mix par rapport aux impacts du mix électrique 2017 utilisé en référence dans cette étude (sauf sur le cas d'étude 11).

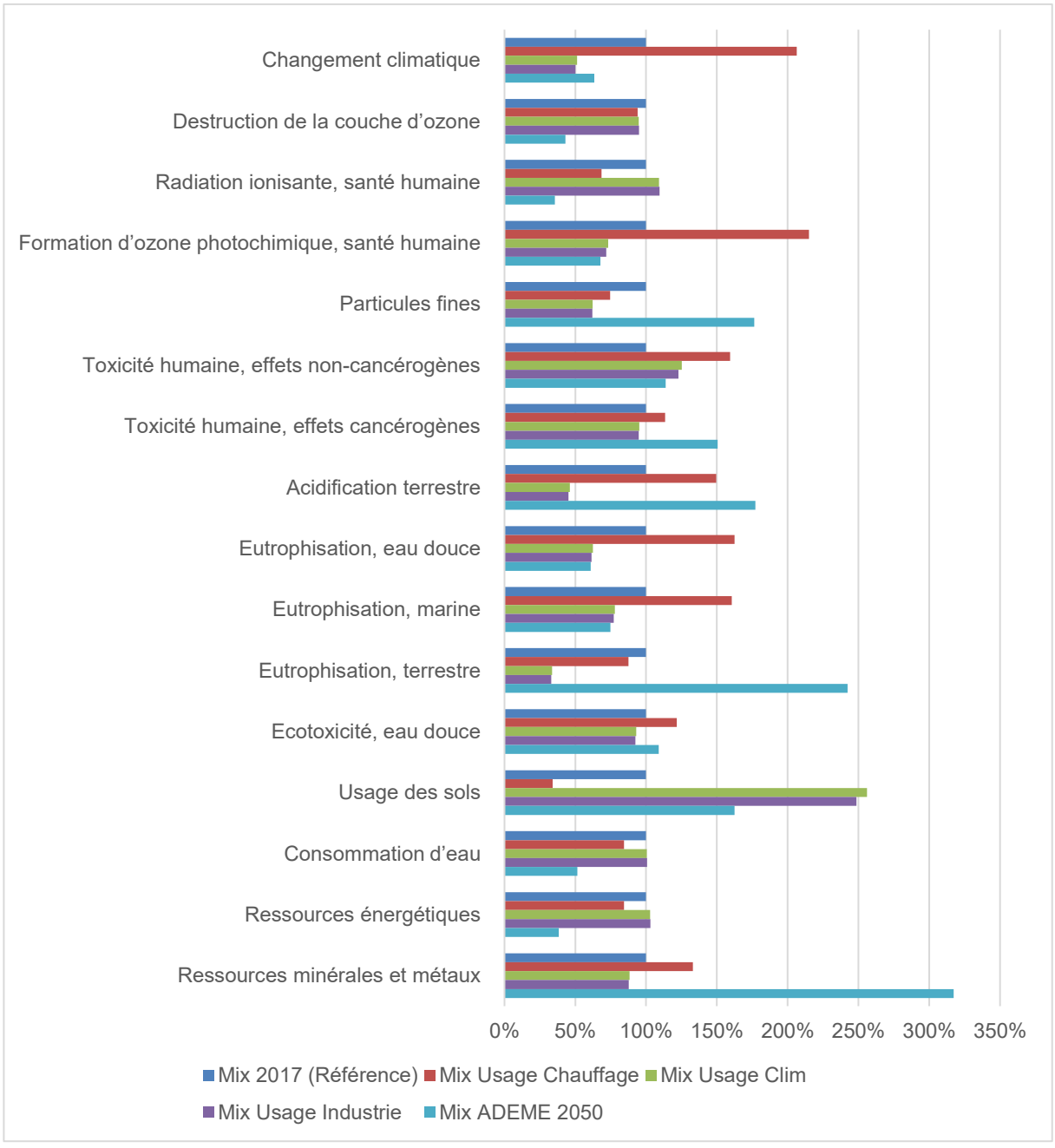


Figure 8-1 : Impacts environnementaux des différents mix utilisés en comparaison au mix 2017

Le tableau ci-dessous donne les valeurs absolues par kWh électrique de mix et permet de rendre compte du mix le plus impactant (en rouge) et du mix le plus favorable (en vert) pour chacun des indicateurs :

Tableau 8-6 : Valeurs absolues par kWh des différents mix utilisés pour les différents impacts environnementaux

		Mix 2017	Mix 2019	Mix par usage - chauffage	Mix par usage - Industrie	Mix par usage - Climatisation	Mix ADEME
Changement climatique	kg CO_2 eq	9,91E-02	7,49E-02	2,09E-01	4,78E-02	4,88E-02	5,82E-02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	5,21E-08	5,08E-08	4,95E-08	4,87E-08	4,87E-08	2,46E-08
Radiation ionisante, santé humaine	kBq U-235 eq	5,20E-01	5,17E-01	3,61E-01	5,61E-01	5,59E-01	2,12E-01
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	kg NMVOC eq	2,23E-04	1,57E-04	4,90E-04	1,57E-04	1,60E-04	1,21E-04
Particules fines	disease inc,	5,25E-09	5,20E-09	3,81E-09	3,18E-09	3,20E-09	1,00E-08
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	CTUh	9,38E-09	7,00E-09	1,55E-08	1,19E-08	1,22E-08	8,32E-09
Toxicité humaine, effets cancérogènes	CTUh	8,45E-10	8,13E-10	1,01E-09	7,71E-10	7,75E-10	1,49E-09
Acidification terrestre	mol H+ eq	6,69E-04	5,48E-04	1,01E-03	2,86E-04	2,92E-04	1,30E-03
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	3,22E-05	1,95E-05	5,42E-05	1,83E-05	1,86E-05	9,41E-06
Eutrophisation, marine	kg N eq	1,16E-04	9,22E-05	1,88E-04	8,77E-05	8,87E-05	8,33E-05
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	2,02E-03	1,95E-03	1,77E-03	6,44E-04	6,57E-04	5,55E-03
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	3,53E-02	3,11E-02	4,40E-02	3,19E-02	3,21E-02	3,14E-02
Usage des sols	Pt	1,29E+00	1,20E+00	3,29E-01	3,26E+00	3,36E+00	2,00E+00
Consommation d'eau	m3 depriv,	1,14E-01	1,12E-01	9,56E-02	1,13E-01	1,13E-01	5,57E-02
Ressources énergétiques	MJ	1,17E+01	1,13E+01	9,95E+00	1,18E+01	1,18E+01	4,99E+00
Ressources minérales et métalliques	kg Sb eq	7,53E-08	7,85E-08	8,00E-08	6,84E-08	6,86E-08	1,86E-07

Pour chacun des indicateurs, la source principale de l'impact du mix le plus impactant a été résumée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8-7 : Source majoritaire d'impact du mix le plus impactant par catégorie d'impact

Catégorie d'impact	Unité	Mix le plus impactant	Source majoritaire de l'impact
Changement climatique	kg CO_2 eq	Mix par usage - chauffage	Emissions directes du charbon et du gaz
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	Mix 2017	Utilisation d'uranium enrichi pour l'électricité nucléaire, l'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse entrainant des émissions d'éthane
Radiation ionisante, santé humaine	kBq U-235 eq	Mix par usage - Industrie	Utilisation d'uranium enrichi pour l'électricité nucléaire et du traitement des déchets miniers
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	kg NMVOC eq	Mix par usage - chauffage	Emissions directes liées à l'utilisation de charbon
Particules fines	disease inc,	Mix ADEME	Emissions liées à la production de biogaz sous l'hypothèse très conservatrice de stockage des substrats et digestat à l'air libre
Toxicité humaine, effets non-cancérogènes	CTUh	Mix par usage - chauffage	Emissions liées au charbon
Toxicité humaine, effets cancérogènes	CTUh	Mix ADEME	Emissions liées à l'utilisation d'acier dans les installations nucléaires et éoliennes
Acidification terrestre	mol H+ eq	Mix ADEME	Emissions liées à la production de biogaz sous l'hypothèse très conservatrice de stockage des substrats et digestat à l'air libre

Catégorie d'impact	Unité	Mix le plus impactant	Source majoritaire de l'impact
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	Mix par usage - chauffage	Emissions liées au traitement des déchets miniers de charbon
Eutrophisation, marine	kg N eq	Mix par usage - chauffage	Emissions liées à la lixiviation du charbon et au traitement des résidus miniers d'extraction d'uranium
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	Mix ADEME	Emissions liées à la production de biogaz sous l'hypothèse très conservatrice de stockage des substrats et digestat à l'air libre
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	Mix par usage - chauffage	Emissions liées au charbon
Usage des sols	Pt	Mix par usage - Climatisation	Exploitation forestière pour la cogénération à partir de biomasse
Consommation d'eau	m3 depriv,	Mix 2017	Eau consommée pour produire de l'électricité nucléaire
Ressources énergétiques	MJ	Mix par usage - Industrie	Utilisation du minerai d'uranium
Ressources minérales et métalliques	kg Sb eq	Mix ADEME	Emissions liées à l'utilisation d'acier dans les installations nucléaires et éoliennes

ANNEXE 3 : Déclaration de revue critique d'ACV

Cette annexe présente la déclaration rédigée par le comité de revue critique à l'issue de ses travaux. Le rapport détaillé de revue critique, qui présente tous les commentaires qui ont été fait et les réponses apportées par les praticiens est consultable sur demande auprès de l'ADEME.

Analyse du cycle de vie (ACV) de systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de grande puissance

Déclaration de revue critique d'ACV

Revue critique réalisée par :

Pyrène Larrey-Lassalle (NOBATEK/INEF4)

Marion Sié (VERSo)

Damien Dufour (ESTEANA)

Commanditaire de la revue :	Rapport d'ACV examiné :
ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie Référent ADEME : Marie SAUZE Direction Productions et Energies Durables Service Réseaux et Energies Renouvelables Centre de Sophia Antipolis - 500 route des Lucioles 06 560 Valbonne Tél : 04 93 95 72 61 Email : marie.sauze@ademe.fr	**Analyse du cycle de vie (ACV) de systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de grande puissance – Basés sur des pompes à chaleur ou des installations solaires thermiques – Rapport d'étude – Version finale** (550 pages) Réalisation : Groupement Solinnen / ENGIE Lab CRIGEN / TRACTEBEL Fichier : ▪ 2020 10 02 ADEME ACV EnR - Rapport d'étude final_pour_revue (reçu le 02/10/2020)

1 OBJECTIFS DE LA REVUE CRITIQUE

Le présent rapport est une revue critique d'ACV conforme aux principes de la norme ISO 14040 et aux exigences de la norme ISO 14044. L'objectif principal de la revue critique est d'assurer la cohérence de l'étude avec les normes d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040/44) et le référentiel ILCD, en garantissant que :

- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont cohérentes avec les normes ISO 14040/44,
- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont valables d'un point de vue scientifique et technique,
- les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude,
- les interprétations reflètent les limitations identifiées et les objectifs de l'étude,
- le rapport d'étude est transparent et cohérent.

2 DÉROULEMENT DE LA REVUE CRITIQUE

La présente revue critique porte sur une ACV de systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de grande puissance basés sur des pompes à chaleur ou des installations solaires thermiques, réalisée par un groupement constitué de Solinnen, ENGIE Lab CRIGEN et TRACTEBEL.

Cette revue critique a été réalisée par un comité de trois experts : Pyrène Larrey-Lassalle (Nobatek/INEF4) en qualité de présidente du comité de revue critique, Marion Sié (VERSo) et Damien Dufour (Esteana). L'expertise méthodologique dans le domaine de l'analyse de cycle de vie et de la réalisation de revues critiques selon les normes en vigueur est principalement apportée par Nobatek/INEF4 et VERSo. Les experts s'appuient sur les normes ISO 14040 : 2006 et ISO 14044 : 2006, la norme ISO/TS 14071 : 2014, et le référentiel ILCD. L'expertise technique propre à la définition des systèmes techniques et des données d'inventaire associées est apportée par Esteana.

La revue critique a été effectuée parallèlement à l'étude. Le présent document présente donc les commentaires du comité de revue critique suite à l'envoi par voie électronique des différentes versions du rapport d'analyse de cycle de vie :

- Rapport d'étude Version intermédiaire 2 (26/08/2019)

- Rapport d'étude Version intermédiaire 3 (30/03/2020)

- Rapport d'étude Version intermédiaire 4 (06/07/2020)

- Rapport d'étude Version finale (Septembre 2020)

La présente vérification a porté sur les rapports d'ACV fournis au comité de revue critique, incluant une description du modèle d'inventaire de cycle de vie (ICV). Aucune vérification de la modélisation (c'est-à-dire des fichiers et données informatiques telles qu'elles ont pu être modélisées et saisies par le groupement Solinnen / ENGIE Lab CRIGEN / TRACTEBEL dans les logiciels qui ont été utilisés pour cette étude) n'a été réalisée.

Conformément à la norme ISO 14071, les praticiens de revue ont étudié les choix techniques et méthodologiques et leur cohérence avec les normes d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040/44) et le référentiel ILCD, et ont relevé les points de vigilance / bloquants pour la suite de l'étude sous la forme d'un **tableau** établi sur la base du modèle fourni par la norme ISO 14071 (modèle de rapport de revue critique).

L'auteur des commentaires est précisé dans le tableau par ses initiales :

- Pyrène Larrey-Lassalle : PLL
- Marion Sié : MS
- Damien Dufour : DD

Les commentaires peuvent être d'ordre éditorial (orthographe, typographique, coquille, structure du rapport), liés à la méthodologie ACV (conformité avec ISO14040/44, recommandation ILCD), ou relatifs aux hypothèses (besoin de clarification, de précision, de complément, de reformulation, de correction, de justification, d'explication de la pertinence des données utilisées, des choix de modélisation, des sources, etc.). L'importance du commentaire est également évaluée qualitativement : majeure / mineure / suggestion.

Les praticiens de revue ont commenté le projet de rapport de l'ACV et donné aux réalisateurs de l'étude d'ACV la possibilité d'améliorer leur travail. Des échanges (par système Visio, mails) entre le groupement en charge de l'étude d'ACV, le commanditaire de l'étude d'ACV et les praticiens de revue ont permis d'échanger les points de vue et d'aboutir à une compréhension commune des commentaires de la revue, ainsi que sur les actions entreprises suite à ces commentaires. Suite aux réponses du groupement en charge de l'étude ACV aux commentaires des praticiens de revue, de nouveaux commentaires et recommandations se sont parfois avérés nécessaires. Le comité de revue critique souligne que des échanges très constructifs ont été établis avec le groupement en charge de l'étude ACV, qui a apporté des réponses satisfaisantes à toutes les remarques et suggestions formulées par le comité de revue critique.

Conformément à la norme ISO 14071, afin de documenter toutes les questions abordées au cours du processus de revue critique, le rapport de revue critique intègre les commentaires et recommandations des praticiens de revue, ainsi que les réponses correspondantes apportées par le groupement en charge de l'étude d'ACV.

3 EVALUATION DU RAPPORT DE L'ÉTUDE ACV

Le rapport de l'étude est en général jugé de très bonne qualité. Les principaux commentaires de revue critique (commentaires majeurs) pour chaque étape de l'ACV sont repris dans cette section *en italique*.

- **Les objectifs de l'étude sont clairs et bien expliqués.**

  Des précisions ont été demandées par le comité de revue critique : elles concernaient notamment une mention des liens ou conflits d'intérêt entre les acteurs, une mise en contexte sur les réseaux urbains de chaleur et de froid, une présentation sommaire de l'ACV, une clarification et harmonisation du vocabulaire concernant les systèmes étudiés, ou encore la spécification du champ et du type de revue critique.

- **La description du champ de l'étude est complète, les systèmes étudiés bien documentés et détaillés, les choix méthodologiques (fonctions et unités fonctionnelles, frontières du systèmes et critères de coupure, méthode d'évaluation de l'impact) argumentés, cohérents et valables d'un point de vue scientifique et technique.**

  Cependant, plusieurs points de vigilance majeurs ont été identifiés pendant le processus de revue critique et ont été pris en compte par le groupement en charge de l'étude. Ces points ont porté notamment sur :

  - *Un manque de précisions sur la validité géographique et temporelle du dimensionnement des systèmes et des typologies de bâtiment, et un besoin de justifications pour ces choix de dimensionnement et pour certaines hypothèses réalisées dans la définition des scénarios (par exemple, besoin de froid nul, exclusion du réseau gaz, pertes thermiques, remplacement éventuel des fluides frigorigènes, dimensionnement des PAC, systèmes d'appoint, installation du réseau électrique, …). Le groupement en charge de l'étude a pris en compte ces remarques, apporté les précisions demandées, et ajouté les éléments manquants le cas échéant, ce qui a permis de garantir la validité des résultats dans le périmètre géographique et temporel souhaité.*
  - *Une justification du choix des systèmes comparatifs (par exemple basé sur des pratiques courantes / parts de marché…) a également été demandée. Le groupement en charge de l'étude a précisé que les choix des scénarios avaient été faits par l'ADEME en amont de l'étude.*
  - *Une discussion sur la prise en compte de la future RE2020 (au lieu de la RT2012 ou de la RT2005 avec le label BBC) a été proposée par le comité de revue critique.*
  - *La nécessité d'une explication plus approfondie de l'indice annuel de rigueur climatique, de la méthodologie qui en découle pour le choix des dates, ainsi que sur la définition des courbes de demande / courbes de charges.*
  - *Des précisions ont été demandées sur la prise en compte des dynamiques de production / consommation :*
    - *Concernant les données d'activité le groupement en charge de l'étude a précisé que la modélisation de l'équilibre offre - demande de chaleur était réalisée de manière dynamique (TRNSYS).*

- *Concernant la composition du mix électrique consommé dans les bâtiments résidentiels, le groupement a finalement compilé la demande horaire à la production horaire sur l'année de référence des scénarios.*

- *La justification du choix de la base de données d'arrière-plan (cut-off vs. APOS) : les principes de modélisation cut-off et APOS se distinguent au niveau de la philosophie qui sous-tend la prise en compte des matières et énergies dits "secondaires", c'est à dire issus d'un recyclage ou d'une valorisation. La principale conséquence de la modélisation choisie se situe dans le mode de prise en compte de ces entrants secondaires :*

  *- Avec une modélisation **cut-off**, les entrants secondaires n'ont aucune charge environnementale pour celui qui les utilise, et celui qui les met sur le marché ne reçoit aucun crédit pour le recyclage de ses déchets. C'est la modélisation la plus utilisée et plus compréhensible pour les non-experts.*

  *- **APOS** quant à elle est une approche qui attribue une charge environnementale aux matières et énergies issus d'un recyclage ou d'une valorisation, en intégrant une part des cycles précédents. Cette modélisation est plus délicate à interpréter car elle prend en compte les liens entre les différents secteurs d'activités.*

  Après divers échanges entre Solinnen et réviseurs, et suite à une communication avec Dieuwertje Schrijvers (PhD - Postdoctoral researcher, The Life Cycle Group CyVi - University of Bordeaux – ISM, qui a fait sa thèse sur les méthodes de modélisation du recyclage, en analysant les différents référentiels et en faisant des recommandations sur les méthodes à utiliser en fonction de l'objectif), il a été établi que l'on pouvait douter de la conformité des préconisations ILCD en Situation A à l'ISO 14040-44. Il a été jugé que modéliser les intrants secondaires avec APOS et faire de la substitution pour les sortants à recycler n'était pas cohérent, alors que la norme ISO 14044 préconise la cohérence de la modélisation d'un même flux sur l'ensemble du cycle de vie (§ 4.3.4.2). La version cut-off des données a donc été sélectionnée.

  A noter que dans la mesure où la consommation d'entrants secondaires n'est pas un enjeu particulier pour la présente étude, le choix fait sur ce point ne devrait pas avoir de conséquences importantes sur la robustesse des conclusions de l'étude.

- *Une précision des critères de coupure, en particulier pour les fluides frigorigènes, a été demandée par le comité de revue critique.*

- *Une précision de la méthode d'évaluation de l'impact a été également apportée à la demande du comité de revue critique.*

- *Enfin, il a été proposé de rajouter une discussion générale sur la prise en compte (ou non) de l'impact environnemental du rejet de chaleur dans la nature (air, eau…) dans l'ACV.*

❖ **L'inventaire du cycle de vie, présenté dans le Chapitre 4 et en Annexe 1, est bien détaillé dans le rapport. Les données utilisées sont jugées appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude. La qualité des données de premier plan et d'arrière-plan a été évaluée qualitativement selon les critères de représentativité temporelle, géographique, technologique, de complétude, et de précision.**

L'ICV a généré quelques questions et propositions d'amélioration, notamment sur :

- *La modélisation des fluides frigorigènes (extrapolations réalisées) et la pertinence des regroupements proposés pour les équipements.*
- *La prise en compte de la dynamique des impacts environnementaux du mix électrique (analyse de sensibilité sur l'impact du mix électrique), afin de s'assurer de la validité des conclusions dans la mesure où l'impact du mix varie beaucoup selon le moment de la journée où il est consommé.*
- *Des précisions sur le modèle d'inventaire de cycle de vie utilisé : il n'était pas clair si l'inventaire avait été modélisé par le groupement en charge de l'étude ACV, ou si un ICV existant avait été directement utilisé ou adapté. Par souci de transparence et afin d'assurer la reproductibilité de l'étude, il a également été demandé de donner le nom de l'inventaire associé. Le groupement en charge de l'étude a fourni en Annexe 1 le détail des procédés ecoinvent utilisés pour la production / inventaires matières, la mise en forme, le transport, et l'énergie.*
- *La fourniture des documentations techniques des équipements, afin de vérifier les règles d'extrapolation massique et la modélisation. Il a été constaté que ces règles d'extrapolation massique sont cohérentes et plutôt conservatrices. Cependant, concernant la modélisation, des approximations ont été constatées, notamment avec l'absence de prise en compte de certaines matières mentionnées dans les documentations. Le groupement en charge de l'étude a confirmé ces approximations dans la modélisation de certains équipements, en précisant avoir fourni un effort de collecte principalement sur les données les plus contributrices aux indicateurs analysés. Ils ont vérifié que ces approximations avaient des influences faibles sur les résultats finaux. Enfin ils ont souligné dans le rapport la limite de ces modélisations pour des recommandations d'éco-conception.*
- *A la demande du comité de revue critique, un exemple a été rajouté pour illustrer l'application de la Circular Footprint Formula pour la gestion de la fin de vie.*

❖ **L'évaluation de l'impact du cycle de vie et l'interprétation des résultats est réalisée à la lumière des incertitudes inhérentes aux méthodes d'évaluation de l'impact et des limites de l'étude identifiées dans les objectifs et le champ de l'étude.**

La procédure d'analyse commune à tous les cas d'étude est très claire et logique : 1) évaluation des impacts midpoint et dommages endpoint, 2) identification des impacts midpoint pertinents (basée sur l'analyse de contribution aux dommages), 3) analyse des résultats midpoint sur les catégories d'impact pertinentes, incluant une comparaison des systèmes, puis une analyse de contribution pour identifier les étapes du cycle de vie les plus contributrices, puis au sein de ces étapes les principaux procédés responsables des impacts, et enfin les sous-processus ou les flux élémentaires responsables, 4) Synthèse des résultats et conclusions.

Le comité de revue critique souligne en particulier les efforts d'interprétation et de précision réalisés pour l'interprétation des résultats : le groupement en charge de l'étude ACV a poussé l'analyse jusqu'à l'identification des sous-procédés ou flux élémentaires les plus impactants, ce qui facilite au lecteur la compréhension des impacts des systèmes étudiés. L'Annexe 2, et notamment le Tableau 8.7, est également un vrai plus pour l'analyse. Enfin, la cohérence entre les analyses a été assurée.

Cependant certains points ont été proposés par le comité de revue critique pour améliorer l'interprétation des résultats :

- *Un des principaux commentaires du comité de revue critique a été formulé dans l'objectif de s'assurer que les interprétations reflètent les limitations associées aux incertitudes sur les facteurs de caractérisation des méthodes d'évaluation de l'impact. Le comité de revue critique a demandé au groupement en charge de l'étude ACV de qualifier ce qu'il entendait par « différence significative » lors de la comparaison de scénarios. D'après Jolliet et al. cette différence n'est pas la même selon l'indicateur considéré (de l'ordre de ~10% pour l'énergie et le changement climatique, ~30% pour les catégories d'impact respiratoire inorganique, acidification et eutrophisation, et ~90% (environ 1 ordre de grandeur) pour les catégories de toxicité). Ces ordres de grandeur sont essentiels pour l'analyse des résultats et permettent de prendre du recul sur les conclusions. Le groupement en charge de l'étude a proposé de se baser sur les niveaux de recommandation de l'indicateur pour définir les écarts nécessaires à considérer pour dire qu'une différence d'impact entre deux systèmes est significative (niveau I : 10 % ; niveau II : 30 % ; niveau III : 50 %). Dans la même logique, l'identification des scénarios les moins/plus impactants (code couleur vert/rouge) a été appliquée aux impacts relatifs de chacun des scénarios (en respectant ces seuils d'écarts à considérer par indicateur) et non aux résultats bruts en valeurs absolues comme réalisé initialement.*
- *Le choix des indicateurs midpoint dans le domaine des ressources naturelles a également été questionné. Il a été proposé d'appliquer la même méthode de sélection que pour les autres indicateurs midpoint (contribution significative aux dommages). Le groupement en charge de l'étude a ajouté l'analyse sur l'indicateur ressources énergétiques.*
- *Le comité de revue critique a aussi demandé de pousser l'analyse sur les indicateurs endpoint (au-delà de la sélection des indicateurs midpoint). Suite à ce commentaire, le groupement en charge de l'étude a ajouté d'une conclusion qui tient compte des résultats endpoint.*

- **Analyses de sensibilité locales : ces analyses apportent une réelle valeur ajoutée à l'étude et permettent de challenger les conclusions tirées dans l'évaluation de l'impact du cycle de vie.**
  - *Les conclusions sur les analyses de sensibilité pour chaque cas d'étude étaient très claires, mais la section étant très dense, le comité de revue critique a proposé de rajouter un tableau synthétique permettant de renseigner le lecteur "au premier coup d'œil" sur la robustesse des conclusions. Cette proposition a été suivie par le groupement en charge de l'étude qui a intégré un tableau récapitulatif de l'influence des différents paramètres sur la hiérarchie entre les scénarios pour chaque cas d'étude.*
  - *Une précision a été demandée sur l'analyse de sensibilité menée sur le taux de couverture solaire (cas d'étude 4). Le groupement en charge de l'étude a alors précisé dans le rapport que l'analyse de sensibilité était faite sur le dimensionnement et non l'ensoleillement moyen annuel.*
  - *A noter que le comité de revue critique a également proposé d'inclure une analyse de sensibilité à l'indice annuel de rigueur climatique, mais cette analyse de sensibilité n'était pas compatible avec le budget de l'étude, et cet élément a été mentionné dans les limites de l'étude.*

- **Analyses d'incertitude : ces analyses, introduites de manière très pédagogique dans le Chapitre 7, permettent de prendre du recul sur les conclusions tirées dans l'évaluation de l'impact du cycle de vie.**

Comme pour l'interprétation des résultats précédente, le principal commentaire du comité de revue critique a été formulé dans l'objectif de s'assurer que les conclusions dans cette section reflètent les limitations associées aux incertitudes sur les facteurs de caractérisation des méthodes d'évaluation de l'impact. Le comité de revue critique a demandé au groupement en charge de l'étude de prendre en compte ce que l'on peut considérer comme « différence significative » pour départager les systèmes et de tirer les conclusions à la lumière de ces pourcentages d'écart significatifs pour chaque indicateur.

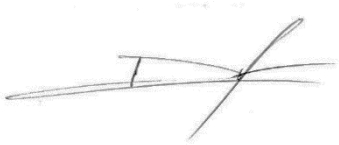
- **Les conclusions générales sont très bien rédigées : la synthèse est claire et les parties recommandations apportent la justesse et la nuance nécessaires. Le classement final des scénarios intègre les analyses de sensibilité et d'incertitude qui reflètent les limitations identifiées dans l'étude. Les paragraphes détaillant les limites à la généralisation des conclusions, les enseignements généraux tous cas d'étude confondus ainsi que les perspectives sont pertinents et apportent une réelle valeur ajoutée à la conclusion du rapport.**

- **Plus généralement, la transparence du rapport est jugée excellente.**

  Durant la revue critique, le comité de revue critique a proposé de rajouter certains éléments (par exemple un glossaire) pour faciliter la lecture/compréhension du lecteur. Ces propositions ont généralement fait l'objet de commentaires mineurs ou de suggestions, qui sont détaillés dans le rapport de revue critique.

4 CONFORMITÉ DU RAPPORT FINAL DE L'ÉTUDE ACV

L'étude est déclarée conforme avec l'ISO 14040 et l'ISO 14044.

Pyrène Larrey-Lassalle Présidente du comité de revue critique	**Marion Sié** Membre du comité de revue critique	**Damien Dufour** Membre du comité de revue critique
		
Le 17/11/2020	Le 17/11/2020	Le 17/11/2020

5 RÉFÉRENCES NORMATIVES

- Norme ISO 14040, Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre, octobre 2006.
- Norme ISO 14044, Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices, octobre 2006.
- Norme ISO/TS 14071, Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Processus de revue critique et compétences des vérificateurs : Exigences et lignes directrices supplémentaires à l'ISO 14044 :2006, juin 2014.
- International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

LES COLLECTIONS
DE L'ADEME

ILS L'ONT FAIT
L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.

FAITS ET CHIFFRES
L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

HORIZONS
L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE SYSTEMES RENOUVELABLES DE PRODUCTION DE CHALEUR ET DE FROID DE GRANDE PUISSANCE

Résumé Cette étude a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux de plusieurs systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid, de puissance supérieure à 250 kW via la méthode d'analyse du cycle de vie. Les systèmes étudiés sont basés sur des pompes à chaleur géothermiques ou des installations solaires thermiques.
L'étude comprend onze cas d'études, représentatifs de différents contextes d'utilisation des systèmes de production de chaleur et de froid de grande puissance :

- 5 cas d'étude couvrent des usages de réseaux urbains.
- 6 cas d'étude couvrent des usages industriels.

EXPERTISES

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr