



# CHAIRE INTERNATIONALE SUR LE CYCLE DE VIE



## RAPPORT TECHNIQUE

### ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES FILIÈRES DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'ÉNERGIE THERMIQUE À PETITE ÉCHELLE

Juin 2013

*Préparé pour :*

#### **Hydro-Québec**

Unité environnement et développement durable  
Direction principale Environnement et Affaires corporatives  
75 boul. René-Lévesque ouest, 2ème étage  
Montréal (Québec) H2Z 1A4



**POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL**

LE GÉNIE  
EN PREMIÈRE CLASSE

**ESG UQÀM**

Ce rapport a été préparé par la Chaire internationale sur le cycle de vie, unité de recherche du CIRAIG (le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services).

Fondé initialement par l'École Polytechnique de Montréal, en collaboration avec l'Université de Montréal et l'École des Hautes Études Commerciales de Montréal, le CIRAIG a été mis sur pied afin d'offrir aux entreprises et aux gouvernements une expertise universitaire de pointe sur les outils du développement durable. Le CIRAIG est le seul centre de recherche interuniversitaire sur le cycle de vie au Canada. Il est également un des plus importants sur le plan international.

**AVERTISSEMENT :**

À l'exception des documents entièrement réalisés par le CIRAIG, tel que le présent rapport, toute utilisation du nom du CIRAIG ou de l'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG ou de l'École Polytechnique.

**Chaire internationale sur le cycle de vie**

Unité de recherche du CIRAIG

École Polytechnique de Montréal  
Département de génie chimique  
2900, Édouard-Montpetit  
Montréal (Québec) Canada  
C.P. 6079, Succ. Centre-ville  
H3C 3A7

<http://www.chaire-cycledevie.org/fr/>

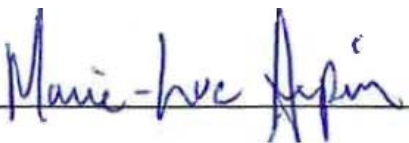
## Équipe de travail

---

### Réalisation

Marie-Luc Arpin, M.Sc.

Réalisation de l'ACV des filières thermiques

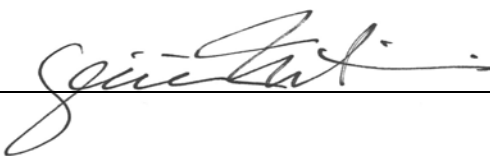


---

### Collaboration

Geneviève Martineau, ing., M.Sc.A.

Analyste senior, Révision interne et réponse  
aux réviseurs



---

Renée Michaud, ing., M. Ing.

Directrice des affaires industrielles

Coordination du projet

*Projet réalisé sous la responsabilité du Pr. Réjean Samson, ing., Ph.D.*

### Revue critique par un comité d'experts indépendants

Gontran Bage, ing. Ph.D.

Présidence du comité de révision

Ingénieur senior, chez Dessau au moment d'initier la revue critique.

Reda Djebbar, ing. Ph.D.

Révision

CanmetÉnergie – Ressources naturelles Canada

Philippe Pasquier, ing., Ph.D.

Révision

Dép. des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal



## Sommaire

---

Hydro-Québec a mandaté la Chaire internationale sur le cycle de vie pour qu'elle analyse et compare au moyen de la méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) le profil environnemental de différentes filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle.

Les objectifs de cette étude sont de :

1. Établir le profil environnemental de cycle de vie de différents systèmes génériques de production décentralisée d'énergie thermique utilisés dans des conditions climatiques québécoises moyennes ;
2. Identifier les points chauds (c.-à-d. les plus grands contributeurs à l'impact) et les paramètres clés (c.-à-d. les paramètres qui influencent le plus le bilan environnemental) propres aux différents systèmes à l'étude ;
3. Comparer les systèmes entre eux et avec un système de chauffage électrique alimenté par le réseau provincial d'Hydro-Québec (système de référence).

Les technologies modélisées sont dites à *petite échelle*, car elles fournissent moins de 50 kilowatts (kW) (soit un maximum théorique de 438 000 kilowattheures (kWh)/an, considérant une production efficace à 100 % durant toute l'année) et leur énergie est dite *décentralisée*, car leur exploitation se fait à proximité des bâtiments à approvisionner. De telles installations permettent à leurs propriétaires de produire l'énergie thermique nécessaire au chauffage des pièces et de l'eau de consommation de leur résidence.

En tout, cinq technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ont été retenues et comparées au système de référence :

- Systèmes géothermiques
  1. Pompe à chaleur liquide-air monobloc : capacité 10 kW, durée de vie globale de 50 ans<sup>1</sup>, 72 000 MJ/an, COP = 3,5
  2. Pompe à chaleur liquide-eau (ou hydronique) : capacité 10 kW, durée de vie globale de 50 ans, 72 000 MJ/an, COP = 3,9
- Systèmes solaires thermiques
  3. Système thermosolaire à collecteurs plats : 6 m<sup>2</sup> de captage, durée de vie globale de 25 ans, 7 766 MJ/an en moyenne.
  4. Système thermosolaire à tubes sous vide : 10,5 m<sup>2</sup> de captage, durée de vie globale de 25 ans, 18 744 MJ/an en moyenne.
  5. Système thermosolaire à collecteurs à air vitrés : deux capteurs, durée de vie globale de 37,5 ans, 10 800 MJ/an en moyenne.
- Le système de référence comprend quant à lui des plinthes électriques de 1 000 W et un chauffe-eau électrique de 60 gallons (227 litres), alimentés par le réseau québécois (soit l'énergie produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée de producteurs privés et les importations) de manière à représenter l'électricité disponible chez le consommateur en 2011. Le mélange d'approvisionnement final considéré est composé à 95,73 %

---

<sup>1</sup> La durée de vie « globale » d'un système est basée sur la longévité de sa principale composante, soit la boucle souterraine dans le cas des systèmes géothermiques et les capteurs solaires dans le cas des systèmes solaires thermiques. Les autres composantes des systèmes peuvent cependant avoir des durées de vie différentes. La modélisation a pris en compte les spécificités de chacune.

d'hydroélectricité; 2,37 % de nucléaire; 0,35 % de charbon; 0,19 % de gaz naturel; 0,74 % d'éolien et 0,51 % de biomasse.

Les systèmes géothermiques évalués permettent de chauffer à la fois les espaces (l'air) et l'eau sanitaire. Les systèmes solaires thermiques utilisés en contexte québécois sont plus fréquemment utilisés pour chauffer soit l'air ambiant ou l'eau de consommation. Il est néanmoins possible de chauffer à la fois des quantités d'eau et d'air au moyen de systèmes solaires thermiques dits hybride (plus répandus en Europe). Les systèmes thermosolaires évalués ont été sélectionnés de manière à refléter ce large éventail de possibilités : le système à collecteurs plats permettant de chauffer uniquement l'eau de consommation, le système à collecteurs à air vitré chauffant uniquement l'air et le système à tubes sous vide assurant une part des deux.

Pour pouvoir comparer les différentes technologies entre elles, et avec le système de référence, une base commune de comparaison a été identifiée (ou unité fonctionnelle) et se définit comme suit :

« Produire 1 mégajoule<sup>1</sup> (MJ) d'énergie se destinant soit au chauffage des espaces ou à celui de l'eau sanitaire, en 2011 ».

Toutes les étapes du cycle de vie des technologies ont été prises en compte dans la présente étude : la production, le transport et l'installation des composantes des systèmes, l'étape d'utilisation et leur fin de vie. Pour ce qui est de l'énergie du réseau d'Hydro-Québec, les infrastructures du réseau de même que les étapes de production, achats et importation, de transmission et de distribution d'électricité (incluant les pertes en ligne) ont été incluses.

Comme cette étude a pour but de fournir des données environnementales quant à différents systèmes génériques, elle a été réalisée à partir de données génériques issues de banques de données commerciales ou de la banque de données du CIRAD, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études divers, ou d'autres sources publiées. Dans tous les cas, les données sélectionnées sont représentatives de systèmes de production décentralisée d'énergie thermique appliqués au Québec, sans pour autant couvrir toutes les options disponibles sur le territoire.

La méthode européenne **IMPACT 2002+** (Joliet *et al.*, 2003) a été employée pour l'évaluation des impacts du cycle de vie, méthode qui permet une agrégation des résultats de quinze indicateurs d'impacts en quatre catégories de dommages : *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique* et *Ressources*. Les indicateurs d'impacts *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*, non pris en compte dans ces catégories, ont été évalués en conjonction avec les indicateurs de dommage pour compléter l'évaluation des impacts du cycle de vie.

## RÉSULTATS

### Profils environnementaux des systèmes

La première analyse a permis d'identifier les processus et paramètres qui contribuent le plus aux impacts potentiels des différents systèmes. Ces profils environnementaux ont fait ressortir les éléments suivants.

---

<sup>1</sup> Un mégajoule correspond à 0,278 kWh d'électricité.

Pour le système de référence (**plinthes et chauffe-eau électriques**) :

- La consommation d'électricité liée à l'**étape d'utilisation** des équipements de chauffage est prédominante, représentant de 88 à 99 % des impacts environnementaux potentiels selon les indicateurs évalués ;
- Les impacts potentiels associés à l'**étape de production d'électricité** sont principalement dus aux importations d'énergie générée à partir de sources fossiles (charbon, gaz naturel) ;
- Le **réseau de distribution** contribue fortement à l'indicateur *Qualité des écosystèmes* à cause de la lixiviation des produits de préservation des poteaux de bois et de la production des câbles de distribution. Il faut cependant noter que les modèles d'évaluation employés pour caractériser les émissions toxiques ont tendance à surestimer les impacts potentiels des métaux émis au sol.

Pour les **systèmes géothermiques** :

- La production de la boucle souterraine et des pompes à chaleur (pour les deux systèmes), celle du plancher radiant (pour le système liquide-eau) et celle du système de ventilation à air pulsé (pour le système liquide-air) se répartissent la quasi-totalité des impacts de l'**étape de production** ;
- L'**étape de distribution** engendre également une part significative des impacts potentiels (10 à 37%) dans toutes les catégories d'indicateurs à l'exception de *Qualité des écosystèmes*. Plus des deux tiers est attribuable à la combustion du diesel nécessaire aux opérations de forage de la boucle souterraine ;
- L'importance de l'**étape d'utilisation** sur les indicateurs *Santé humaine* (44 et 49%), *Ressources* (49 et 59%) et *Acidification aquatique* (39 et 41%) et *Qualité des écosystèmes* (88 et 89%) est en majeure partie attribuable aux impacts découlant de la production et de la distribution de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur et issue du réseau d'Hydro-Québec ;
- L'**étape de fin de vie** des systèmes contribue de manière négligeable aux scores des indicateurs environnementaux évalués ;
- Les **paramètres clés**, soit les paramètres qui influencent le plus la performance environnementale des systèmes étudiés, sont : l'efficacité de la pompe à chaleur (coefficient de performance — COP), la qualité du dimensionnement (éviter le surdimensionnement), la durée de vie, la masse et la provenance des composantes du système.

Pour les **systèmes solaires thermiques à collecteurs plats et à tubes sous vide** :

- L'**étape de production** domine le profil de cinq des six indicateurs considérés, en majeure partie à cause des activités de fabrication du réservoir à eau chaude et des capteurs solaires. La durée de vie relativement courte des composantes (10 ou 25 ans selon les cas), de même que leur plus faible rendement énergétique, réduit leur amortissement, augmentant par le fait même la contribution de l'étape de production ;
- L'**étape de distribution** engendre une part significative des impacts potentiels, surtout à cause du transport des principales composantes vers le lieu d'installation ;
- Comme c'était le cas pour les systèmes géothermiques, la portion des dommages associée à l'**étape d'utilisation** est en grande part attribuable à l'énergie d'exploitation (électricité), sauf pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*. Pour ce dernier, l'impact potentiel découle presque totalement du remplacement du fluide caloporteur : il est

- estimé que le propylène glycol injecté dans les conduites des systèmes solaires à circulation de fluide doit être remplacé tous les 10 ans, soit 2 fois au cours des 25 années d'utilisation de ces systèmes. Dans la modélisation, il a été considéré que le fluide usagé était rejeté aux égouts et traité par une usine municipale de traitement des eaux usées. Ce résultat est très incertain et doit être considéré avec prudence, d'abord parce qu'il existe une incertitude quant à la gestion du fluide caloporteur, et ensuite parce que le processus générique employé pour modéliser le traitement est assez peu représentatif des installations québécoises. Dans ce dernier cas, ce sont les émissions directes de polluants à l'eau qui provoquent une augmentation de la demande chimique en oxygène (DCO), phénomène auquel est associé l'ensemble des impacts attribuables au traitement du fluide caloporteur remplacé. À partir de cette information, on note cependant qu'une attention à la gestion des fluides caloporteurs en fin de vie serait à considérer ;
- **L'étape de fin de vie** a une contribution négligeable, sauf pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*. Cet impact découle en grande partie des effets du traitement du fluide caloporteur en fin de vie (voir paragraphe précédent) ;
  - Les **paramètres clés** sont : la masse et provenance des composantes des systèmes, la durée de vie des capteurs et du réservoir.

Pour le **système solaire thermique à collecteurs à air vitrés** :

- **L'étape de production** domine le profil de cinq des six indicateurs considérés, à cause de la fabrication des capteurs solaires et du système de ventilation ;
- **L'étape d'utilisation** contribue à une part significative des impacts potentiels dans cinq catégories, et elle domine le profil d'impacts en *Qualité des écosystèmes*, à cause des impacts découlant de la production de l'électricité consommée pour le fonctionnement du ventilateur ;
- La faible contribution de **l'étape de distribution** des systèmes aux impacts totaux est uniquement liée au transport des composantes, du distributeur jusqu'au lieu d'installation (distance posée de 500 km) ;
- **L'étape de fin de vie** des systèmes contribue de manière imperceptible au profil pour l'ensemble des indicateurs ;
- Les **paramètres clés** sont : la masse et provenance des composantes du système, la durée de vie du système.

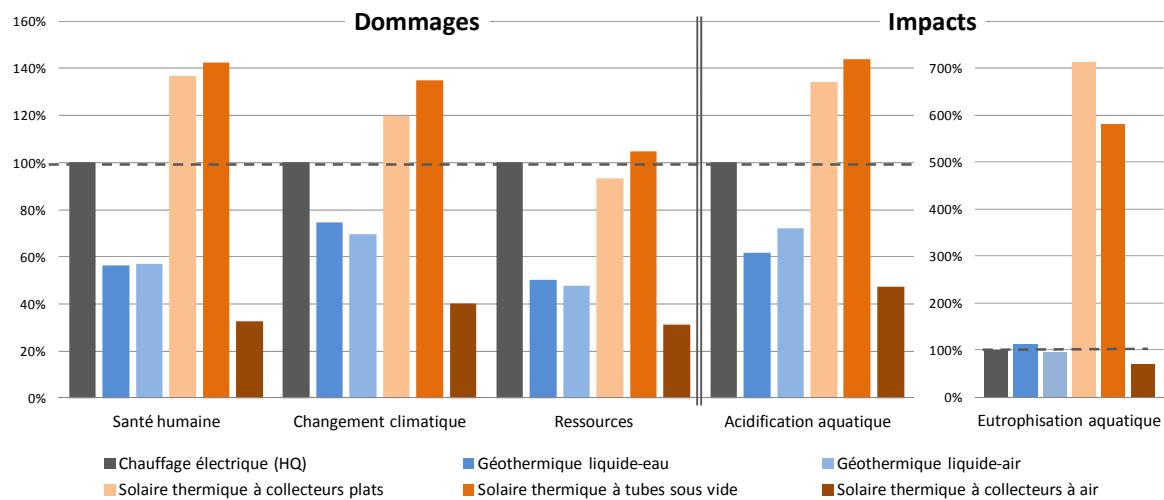
### **Comparaison des systèmes sur la base de la production de 1 MJ d'énergie**

La seconde analyse (Figure 1) a permis de comparer les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique entre eux et avec le réseau provincial d'Hydro-Québec, sur la base de la production de 1 MJ d'énergie thermique.

Dans cette analyse, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* favorise tous les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique par rapport au système électrique de référence, à cause des émissions toxiques au sol potentiellement engendrées par le réseau de distribution du réseau d'Hydro-Québec (poteaux de bois traité). Cependant, les modèles de caractérisation actuellement disponibles ont tendance à surestimer l'impact potentiel des métaux émis au sol, engendrant d'importantes incertitudes pour cet indicateur. Afin de tester la robustesse des résultats de cette catégorie de dommage, une analyse de sensibilité avec une seconde méthode d'évaluation – ReCiPe – a été réalisée et a montré que les tendances observées ne sont pas constantes entre les deux méthodes. Il est donc difficile de conclure sur la base de l'indicateur



*Qualité des écosystèmes* et pour ne pas apporter de confusion, il a été choisi de retirer cet indicateur de la Figure 1 et pour la suite de l'analyse.



**Figure 1 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au MJ d'électricité distribué par Hydro-Québec et utilisé pour le chauffage des espaces ou de l'eau sanitaire.**

Globalement, il en ressort que le chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec (qui correspond à la valeur de 100 % de la Figure 1) est favorisé par rapport à certains systèmes de production d'énergie renouvelable évalués et défavorisé par rapport à d'autres, selon les indicateurs environnementaux considérés.

Il en ressort également que, toutes proportions gardées, les deux systèmes géothermiques présentent des profils semblables, de même que les deux systèmes thermosolaires à circulation de liquide.

De manière plus spécifique, on constate que par rapport au scénario de référence de chauffage électrique et sur la base d'un MJ produit :

- le **système thermosolaire à collecteur à air** présente un bénéfice environnemental potentiel selon tous les indicateurs environnementaux évalués.
- les **systèmes géothermiques** présentent une réduction d'au moins 25 % de l'impact environnemental pour la majorité des indicateurs. Par ailleurs, les systèmes géothermiques liquide-eau et liquide-air sont équivalents au système de référence selon l'indicateur *Eutrophisation aquatique*.
- pour les **systèmes solaires thermiques à collecteurs plats ou à tubes sous vide** l'indicateur *Ressources* présente des résultats similaires au système de référence (étant donné les incertitudes des modèles de caractérisation). Pour les autres indicateurs, les systèmes thermosolaires à circulation de fluide présentent une augmentation de la charge environnementale par rapport au chauffage électrique.
- Autres éléments de comparaison :
  - Les systèmes géothermiques nécessitent des infrastructures beaucoup plus lourdes que les systèmes thermosolaires. La quantité de matériaux requis et les étapes d'installation sont donc plus importantes. Par contre, leur durée de vie de

50 ans est deux fois plus longue que celle des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide et 1,5 fois plus longues que celle du système solaire à collecteurs à air, ce qui a pour effet d'amortir les impacts liés aux étapes de **production** des composantes et de **distribution**.

- À l'étape d'**utilisation** le système solaire à collecteurs plats ne consomme que très peu d'énergie (0,06 MJ pour chaque MJ produit par rapport à 0,26 MJ pour un système géothermique). Malgré cela, les systèmes géothermiques sont avantagés au Québec, puisque le mélange énergétique est « propre », compensant pour son rendement énergétique inférieur.

Sept analyses de sensibilité ont également été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de l'étude, incluant le contexte énergétique du lieu d'installation, le rendement des systèmes géothermiques et des capteurs solaires, la surface de collecteurs solaires installée et leur durée de vie.

De toutes les analyses de sensibilité effectuées, seul le contexte énergétique du lieu d'installation modifie les conclusions. Lorsqu'on considère un mélange d'approvisionnement électrique moyen d'Amérique du Nord pour l'étape d'utilisation, les systèmes solaires à collecteurs plats et à tubes sous vide deviennent plus performants que le chauffage électrique de référence par MJ produit, et ce, selon tous les indicateurs. Les conclusions quant à la demande énergétique d'une résidence moyenne restent cependant inchangées.

Le Tableau 1 présenté plus bas résume les conclusions des analyses réalisées sur la base d'un MJ d'énergie thermique.

### **Comparaison des systèmes sur la base de la demande en énergie d'une résidence moyenne**

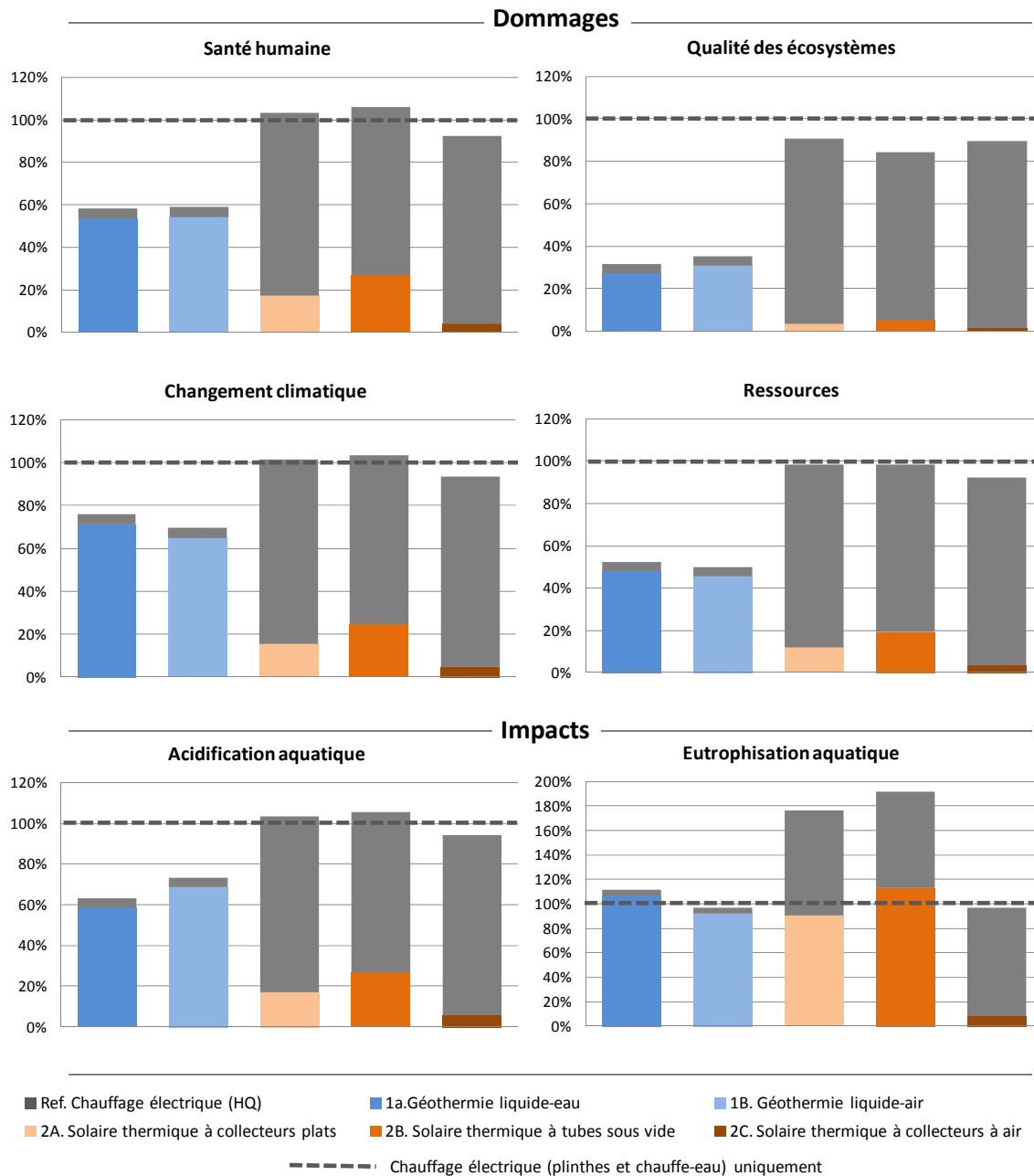
Les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique comparés permettent tous de chauffer de l'air et de l'eau sanitaire. Par contre, du fait de leurs capacités de production bien différentes, chacune des technologies peut combler une part plus ou moins importante de la demande annuelle totale en énergie thermique d'une résidence.

La Figure 2 permet de constater que l'utilisation de la **géothermie** permet de réduire significativement l'empreinte environnementale liée au chauffage. Cette tendance s'explique par le fait que les systèmes géothermiques sont en mesure de remplir à eux seuls 81 % de la demande totale en énergie thermique d'une résidence. L'utilisation des systèmes **solaires thermiques** ne présente, somme toute, aucun gain environnemental par rapport au chauffage à l'électricité à partir du réseau d'Hydro-Québec. En effet, malgré la bonne performance environnementale de la technologie solaire à collecteurs à air, sa faible capacité à combler la demande énergétique d'une résidence, jumelée à la faible empreinte environnementale du mélange énergétique québécois, rend cette option moins intéressante d'un point de vue environnemental.

En outre, l'*Eutrophisation aquatique* présente un profil différent des autres indicateurs évalués : les scénarios à base de géothermie sont équivalents au système de référence et au système solaire à collecteur à air (compte tenu des incertitudes sur les modèles de caractérisation), alors que les deux systèmes solaires à circulation de liquide sont désavantagés dans cette catégorie.

Enfin, lorsque la fonction de climatisation est prise en considération, le **système géothermique liquide-air** est généralement favorisé par rapport aux autres scénarios puisqu'il est le seul à permettre le refroidissement de l'air sans aucun changement à son installation. La géothermie liquide-eau reste également une option à favoriser, même en y ajoutant des climatiseurs muraux pour répondre aux besoins de climatisation.

L'utilisation de thermopompes murales multizones permettant à la fois de climatiser et de chauffer les espaces pourrait également présenter un avantage par rapport au scénario de référence sélectionné. Cette option n'a cependant pas été évaluée, puisqu'elle sort du champ de la présente étude.



**Figure 2 : Profils environnementaux des scénarios permettant de combler la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne en 2011.**

Globalement, on retient que :

- Sur la base de la production de 1 MJ, le **système solaire thermique à collecteurs à air** présente la meilleure performance potentielle selon tous les indicateurs environnementaux considérés ;
- Sur la base de la production de 1 MJ, les **systèmes géothermiques liquide-eau et liquide-air** présentent un gain environnemental potentiel pour tous les indicateurs à l'exception du potentiel d'eutrophisation aquatique pour lequel ils sont équivalents au système de référence ;

- Pour répondre à la demande en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise, les **scénarios à base de géothermie** présentent une performance environnementale potentielle significativement supérieure à celle des autres scénarios, du fait qu'ils sont en mesure de remplir à eux seuls plus de 80% des besoins de la résidence ;
- Lorsque la climatisation est prise en compte, le **système géothermique liquide-air** est généralement favorisé par rapport aux autres scénarios. La géothermie liquide-eau reste également une option à favoriser, même en y ajoutant des climatiseurs muraux. L'analyse détaillée incluant la fonction climatisation est présentée à la sous-section 3.3.3.

Le Tableau 1 résume les conclusions des analyses réalisées sur la base de la demande annuelle en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise. Les conclusions présentées sont applicables dans la mesure où les technologies considérées et les conditions météorologiques sont semblables à celles modélisées dans la présente étude. Les nuances apportées par les analyses de sensibilités sont présentées à la section 3.6 du rapport.

**Tableau 1 : Résumé des tendances observées, par rapport au chauffage électrique de référence**

Indicateur (IMPACT 2002+)	Géothermique liquide-eau	Géothermique liquide-air	Thermosolaire à collecteurs plats	Thermosolaire à tubes sous vide	Thermosolaire à collecteurs à air
<b>Sur la base d'un MJ thermique</b>					
Santé humaine					
Changement climatique					
Ressources					
Acidification aquatique					
Eutrophisation aquatique					
<b>Sur la base de la demande en énergie thermique d'une résidence moyenne</b>					
Santé humaine					
Changement climatique					
Ressources					
Acidification aquatique					
Eutrophisation aquatique					
<b>Légende</b>		L'analyse de base favorise le système de production décentralisée			
		L'analyse de base favorise le système de chauffage électrique de référence			
		L'analyse de base ne permet pas de conclure (système décentralisé <u>équivalent</u> au système de chauffage électrique de référence.			

### **Perspectives et recommandations**

En continuité avec le travail effectué dans le cadre de la présente étude, il serait à la fois pertinent et intéressant de quantifier les bénéfices potentiellement encourus par l'exportation (en Ontario et aux États-Unis) de quantités d'énergie non-consommées au Québec grâce aux systèmes de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle étudiés. Pour ce faire, une approche de modélisation conséquentielle du cycle de vie s'avérerait appropriée.

Par ailleurs, la présente étude a été balisée en fonction des particularités d'un contexte énergétique résidentiel, représentatif de conditions de logement moyennes au Québec. En continuité avec le présent projet, il pourrait s'avérer intéressant d'élargir le champ de l'analyse afin d'inclure un éventail plus large de contextes d'utilisation (ou de types de demandes énergétiques) : en particulier, les bâtiments résidentiels de type condominium, les nouveaux développements ou les bâtiments commerciaux présentent un intérêt.

À la lumière des conclusions obtenues, qui démontrent l'intérêt des systèmes géothermiques et solaires à collecteurs à air sur le plan environnemental, il serait pertinent d'intégrer une analyse de faisabilité économique et technique à l'étude environnementale, afin d'élargir les perspectives et de conclure de manière plus globale sur l'intérêt de ces technologies de production décentralisée.

Cette ACV vise à établir le profil environnemental de cycle de vie de différentes technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle, et à les comparer dans un contexte québécois. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>MISE EN CONTEXTE .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MODÈLE D'ÉTUDE ACV .....</b>	<b>2</b>
2.1	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET APPLICATION ENVISAGÉE .....	2
2.2	DESCRIPTION GÉNÉRALE DES TECHNOLOGIES À L'ÉTUDE .....	2
2.2.1	<i>Technologie de référence.....</i>	3
2.2.2	<i>Systèmes géothermiques.....</i>	3
2.2.3	<i>Systèmes thermosolaires.....</i>	7
2.3	FONCTION ET UNITÉ FONCTIONNELLE .....	11
2.4	TRAITEMENT DES FONCTIONS SECONDAIRES ET RÈGLES D'IMPUTATION.....	13
2.5	FRONTIÈRES DES SYSTÈMES .....	14
2.5.1	<i>Processus inclus dans les systèmes évalués.....</i>	14
2.5.2	<i>Frontières géographiques et temporelles.....</i>	18
2.6	SOURCES, HYPOTHÈSES ET DONNÉES D'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (ICV) .....	18
2.6.1	<i>Données ecoinvent.....</i>	20
2.6.2	<i>Autres données collectées.....</i>	21
2.6.3	<i>Hypothèses .....</i>	22
2.7	ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .....	24
2.8	INTERPRÉTATION.....	26
2.8.1	<i>Analyse de l'inventaire.....</i>	26
2.8.2	<i>Évaluation de la qualité des données d'inventaire .....</i>	26
2.8.3	<i>Analyse de cohérence et de complétude.....</i>	27
2.8.4	<i>Analyses de sensibilité .....</i>	27
2.8.5	<i>Analyse d'incertitude .....</i>	29
2.9	REVUE CRITIQUE .....	31
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>32</b>
3.1	PROFIL ENVIRONNEMENTAL DES SYSTÈMES.....	32
3.1.1	<i>Système de référence (chauffage électrique) et kWh distribué par Hydro-Québec.....</i>	32
3.1.2	<i>Systèmes géothermiques.....</i>	34
3.1.3	<i>Systèmes solaires thermiques à collecteurs plats et à tubes sous vide.....</i>	37
3.1.4	<i>Système solaire thermique à collecteur à air vitré.....</i>	40
3.2	COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE DES SYSTÈMES SUR LA BASE DE LA PRODUCTION DE 1 MJ D'ÉNERGIE .....	42
3.3	COMPARAISON DES SYSTÈMES SUR LA BASE DE LA DEMANDE EN ÉNERGIE D'UNE RÉSIDENCE MOYENNE .....	45
3.3.1	<i>Définition de scénarios.....</i>	46
3.3.2	<i>Résultats comparatifs.....</i>	47
3.3.3	<i>Considération de la fonction climatisation .....</i>	53
3.4	QUALITÉ DES DONNÉES D'INVENTAIRE .....	55
3.5	ANALYSES DE SENSIBILITÉ .....	56
3.5.1	<i>Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe.....</i>	56
3.5.2	<i>Contexte énergétique au lieu d'installation.....</i>	58
3.5.3	<i>Rendement des systèmes géothermiques.....</i>	59
3.5.4	<i>Rendement des capteurs solaires thermiques à circulation de fluide.....</i>	60
3.5.5	<i>Surface de collecteurs installée pour les systèmes solaires thermiques à circulation de fluide.....</i>	60
3.5.6	<i>Durée de vie des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide .....</i>	61
3.5.7	<i>Durée de vie du système solaire thermique à collecteurs à air.....</i>	62
3.5.8	<i>Capacité du système solaire thermique à collecteurs à air (nombre de capteurs installés) ....</i>	62
3.6	RÉSUMÉ DES ANALYSES .....	63
3.7	APPLICATIONS ET LIMITES DE L'ACV.....	65
3.8	RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	67

3.8.1	<i>Recommandations pour améliorer la production d'énergie thermique décentralisée</i> .....	67
3.8.2	<i>Perspectives</i> .....	68
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>71</b>

## Liste des tableaux

---

Tableau 2-1 :	Caractéristiques de performance et flux de référence .....	13
Tableau 2-2 :	Processus inclus et exclus des systèmes .....	16
Tableau 2-3 :	Mélanges d'approvisionnement énergétique utilisés .....	19
Tableau 2-4 :	Processus inclus dans la modélisation du mélange d'approvisionnement québécois (kWh d'Hydro-Québec) .....	20
Tableau 2-5 :	Principales données, sources et hypothèses utilisées dans l'établissement de l'inventaire d'avant-plan – systèmes thermiques.....	22
Tableau 2-6 :	Membres constituants du comité de revue critique .....	31
Tableau 3-1 :	Part de la demande totale en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise comblée par chacun des cinq systèmes à l'étude .....	45
Tableau 3-2 :	Comparaison des résultats d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) divergents entre les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe .....	57
Tableau 3-3 :	Résumé des tendances observées, par rapport au chauffage électrique de référence, sur la base d'un MJ d'énergie thermique.....	64
Tableau 3-4 :	Résumé des tendances observées, par rapport au chauffage électrique de référence, pour répondre à la demande annuelle d'une résidence.....	65



## Liste des figures

Figure 2-1 : Types de puits géothermiques. ....	4
Figure 2-2 : Composantes principales de la pompe à chaleur liquide-air (modèle vertical) de la série AC de Boréale Géothermie.....	6
Figure 2-3 : Schéma simplifié d'une pompe à chaleur liquide-air.....	6
Figure 2-4 : Composantes principales de la pompe à chaleur liquide-eau de la série W de Boréale Géothermie. ....	7
Figure 2-5 : Composantes principales d'un système solaire thermique en circuit fermé pour le chauffage de l'eau sanitaire.....	8
Figure 2-6 : Composantes principales d'un capteur solaire plat (vitré, à circulation de fluide). ....	9
Figure 2-7 : Composantes principales d'un système solaire thermique à tubes sous vide pour le chauffage de l'eau sanitaire et des aires habitées.....	10
Figure 2-8 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire à tubes sous vide.....	10
Figure 2-9 : Principe général de fonctionnement d'un capteur solaire à air (modèle ESOLAIR 2.0 de MC <sup>2</sup> Énergie). ....	11
Figure 2-10 : Exemples d'installations d'un capteur solaire à air (modèle ESOLAIR 2.0 de MC <sup>2</sup> Énergie) : a) installation murale, b) installation sur un toit en pente.....	11
Figure 2-11 : Frontières générales des systèmes à l'étude. ....	15
Figure 2-12 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+ (v.2.05). ....	24
Figure 3-1 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système de référence –chauffage électrique, par MJ produit (IMPACT 2002+).....	33
Figure 3-2 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du kWh distribué par Hydro-Québec (IMPACT 2002+). ....	33
Figure 3-3 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système géothermique liquide-eau, par MJ produit (IMPACT 2002+). ....	35
Figure 3-4 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système géothermique liquide-air, par MJ produit (IMPACT 2002+). ....	35
Figure 3-5 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à collecteurs plats, par MJ produit (IMPACT 2002+). ....	37

Figure 3-6 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à tubes sous vide, par MJ produit (IMPACT 2002+).	38
Figure 3-7 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à collecteurs à air vitrés, par MJ produit (IMPACT 2002+).	40
Figure 3-8 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au MJ d'électricité distribué par Hydro-Québec et utilisé pour le chauffage des espaces ou de l'eau sanitaire (méthode IMPACT 2002+).	43
Figure 3-9 : Profils environnementaux des scénarios permettant de combler la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne en 2011 (IMPACT 2002+).	48
Figure 3-10 : Comparaison des performances environnementales des scénarios de production décentralisée d'énergie thermique, sur la base de leur capacité à répondre à la demande annuelle d'une résidence québécoise moyenne (IMPACT 2002+).	51
Figure 3-11 : Profils environnementaux des scénarios permettant de combler la demande en énergie thermique et en climatisation d'une résidence québécoise moyenne en 2011 (IMPACT 2002+).	54
Figure 3-12 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au MJ d'électricité distribué par Hydro-Québec et utilisé pour le chauffage des espaces ou de l'eau sanitaire (méthode ReCiPe).	56

## Liste des abréviations et sigles

AA	Acidification aquatique (catégorie d'impact environnemental)
ACV	Analyse du cycle de vie
BTU	<i>British thermal unit</i>
CC	Changement climatique (catégorie de dommage environnemental)
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COP	Coefficient de performance
COP <sub>h</sub>	Coefficient de performance (chauffage)
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i>
DCO	Demande chimique en oxygène
EA	Eutrophisation aquatique (catégorie d'impact environnemental)
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais)
ICI	Industries, commerces et institutions
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	Organisation internationale de normalisation
kg CO <sub>2</sub> éq.	Kilogramme de dioxyde de carbone équivalent
kg PO <sub>4</sub> éq.	Kilogramme de phosphate équivalent
kg SO <sub>2</sub> éq.	Kilogramme de dioxyde de soufre équivalent
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
LUCAS	<i>Life cycle impact assessment method Used for a Canadian specific context</i>
MJ	Mégajoules d'énergie
MW	Mégawatt
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
PDF*m <sup>2</sup> *an	« Potentially Disappeared Fraction » sur une certaine surface et sur une durée donnée
PRG	Potentiel de réchauffement global (GWP en anglais)
QÉ	Qualité des écosystèmes (catégorie de dommage environnemental)
R	Ressources (catégorie de dommage environnemental)
SF <sub>6</sub>	Hexafluorure de soufre
SH	Santé humaine (catégorie de dommage environnemental)
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
W	Watt



## 1 Mise en contexte

---

Les systèmes traditionnels d'approvisionnement en énergie électrique (constitués de grands réseaux locaux interconnectés) font désormais face à la progression rapide des performances de différents systèmes de production décentralisée d'énergie. Les technologies de production d'énergie à partir de sources d'énergies renouvelables semblent progresser particulièrement rapidement (Haeseldonckx *et coll.*, 2008). Le mouvement pourrait être aidé par des phénomènes comme les politiques de réduction de gaz à effet de serre. Au Québec, le *Règlement concernant le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre*, qui est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2012, réglemente le secteur de l'électricité à compter de 2013, et étendra la couverture du système au secteur du bâtiment à compter de 2015.

Dans une optique similaire, Hydro-Québec permet aux propriétaires de technologies de production d'électricité admissibles<sup>3</sup> d'injecter leurs surplus de production dans le réseau en échange de crédits, appliqués à leur consommation d'énergie sous la forme de kilowattheures (kWh).

D'un point de vue environnemental et économique, la production décentralisée possède l'avantage de réduire les pertes de transmission, puisque la plus grande part de l'énergie produite est consommée à proximité ou à même les sites de production. Toute technologie nécessite cependant des matériaux et de l'énergie pour sa production, son installation et sa gestion en fin de vie. La prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des technologies paraît donc indispensable à l'établissement d'indicateurs éclairants pour le suivi et l'amélioration de l'option de mesurage net pour autoproducteurs d'Hydro-Québec. Du point de vue technique, plusieurs facteurs pourront également avoir une incidence sur la performance environnementale de ces technologies, notamment les conditions météorologiques locales et donc le contexte géographique d'implantation.

C'est dans ce contexte qu'Hydro-Québec a mandaté la Chaire internationale sur le cycle de vie pour qu'elle analyse et compare au moyen de la méthodologie ACV le profil environnemental de différentes filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle.

L'étude a été réalisée en accord avec les exigences des normes ISO 14 040 et 14 044 (ISO, 2006a, b).

Il est à noter que l'Annexe A présente la méthodologie ACV en détail, comprenant une section définissant les termes spécifiques au domaine.

---

<sup>3</sup> Sont admissibles à l'option de mesurage net les sources d'énergie renouvelables suivantes : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque, la bioénergie (les biogaz ou la biomasse forestière), et la géothermie (à des fins de production d'électricité seulement).

## 2 Modèle d'étude ACV

---

Ce chapitre présente le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV.

### 2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

Le **but de cette étude** est d'analyser le cycle de vie de différentes technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle, et de les comparer.

Plus spécifiquement, les **objectifs** de l'étude sont de :

1. **Établir** le profil environnemental de cycle de vie de différents systèmes génériques de production décentralisée d'énergie thermique utilisés dans des conditions climatiques québécoises moyennes ;
2. **Identifier** les points chauds (c.-à-d. les plus grands contributeurs à l'impact) et les paramètres clés (c.-à-d. les paramètres qui influencent le plus le bilan environnemental) propres aux différents systèmes à l'étude ;
3. **Comparer** les systèmes entre eux et avec un système de chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec (système de référence).

La description des systèmes portés à l'étude est présentée à la section suivante.

Les résultats de l'étude détaillée des systèmes sont envisagés afin d'en améliorer leur compréhension et de contribuer à une réflexion plus large sur la question de l'efficacité énergétique au Québec, en lien avec l'action 3 du plan d'action de développement durable 2009-2013 d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2009).

Conformément aux normes ISO, les revues critiques d'ACV sont facultatives lorsque les résultats sont voués à un usage interne par le mandataire. Cependant, une telle revue est une étape importante et obligatoire pour assurer la validité complète des résultats avant toutes communications publiques, telles que les déclarations environnementales de produits, suivant les normes ISO 14 020, ou les affirmations comparatives rendues publiques, suivant les normes ISO 14 040.

En ce qui a trait à cette étude, une revue critique a été réalisée par un expert ACV externe et un comité d'experts indépendants. Se référer à la section 2.9 pour plus de détail sur le processus de revue critique.

### 2.2 Description générale des technologies à l'étude

La présente étude compare des technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle. Les technologies modélisées sont dites à *petite échelle*, car elles fournissent au plus 50 kilowatts (kW) (soit un maximum théorique de 438 000 kWh/an, considérant une production efficace à 100 % durant toute l'année) et leur énergie est dite *décentralisée*, car leur exploitation se fait à proximité des bâtiments à approvisionner. De telles installations permettent à leurs propriétaires de produire l'énergie thermique nécessaire au chauffage des pièces et de l'eau de consommation de leur résidence. Ce type de production énergétique n'est

pas concerné par l'option de mesurage net pour autoproducteurs d'Hydro-Québec puisqu'il est question de production d'énergie thermique et non électrique.

En tout, cinq technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ont été retenues et comparées au système de référence :

- Systèmes géothermiques
  1. Pompe à chaleur liquide-air monobloc
  2. Pompe à chaleur liquide-eau (ou hydronique)
- Systèmes solaires thermiques
  3. Système thermosolaire à collecteurs plats
  4. Système thermosolaire à tubes sous vide
  5. Système thermosolaire à collecteurs à air vitrés

Les systèmes géothermiques évalués permettent de chauffer à la fois les espaces (l'air) et l'eau sanitaire. Les systèmes solaires thermiques utilisés en contexte québécois sont plus fréquemment utilisés pour chauffer soit l'air ambiant ou l'eau de consommation. Il est néanmoins possible de chauffer à la fois des quantités d'eau et d'air au moyen de systèmes solaires thermiques dits hybrides (plus répandus en Europe). Les systèmes thermosolaires évalués ont été sélectionnés de manière à refléter ce large éventail de possibilités : le système à collecteurs plats permettant de chauffer uniquement l'eau de consommation, le système à collecteurs à air vitré chauffant uniquement l'air et le système à tubes sous vide assurant une part des deux.

Les sous-sections qui suivent décrivent les cinq technologies évaluées ainsi que la technologie de référence (réseau d'Hydro-Québec). Plus de détail quant aux technologies modélisées est également disponible à la section 2.6.

### **2.2.1 Technologie de référence**

Au Québec, près de 68 % de l'énergie thermique résidentielle consommée provient du réseau d'Hydro-Québec, alors qu'un peu moins de 6 % des ménages utilisent le gaz naturel pour se chauffer, un peu plus de 17 % utilise le mazout et environ 9 % le bois (Michaud et Belley, 2008). Compte tenu de sa nette prédominance au Québec, le chauffage électrique a donc été choisi comme base de comparaison.

Le système de référence modélisé est constitué de plinthes électriques de 1 000 W et d'un chauffe-eau électrique de 60 gallons (227 litres), alimentés par le réseau québécois (soit l'énergie produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée de producteurs privés et les importations) de manière à représenter l'électricité disponible chez le consommateur en 2011. Le mélange d'approvisionnement final considéré est composé à 95,73 % d'hydroélectricité; 2,37 % de nucléaire; 0,35 % de charbon; 0,19 % de gaz naturel; 0,74 % d'éolien et 0,51 % de biomasse.

Le Tableau 2-3 présenté à la section 2.6 détaille le *grid mix* québécois considéré dans le cadre de l'étude.

### **2.2.2 Systèmes géothermiques**

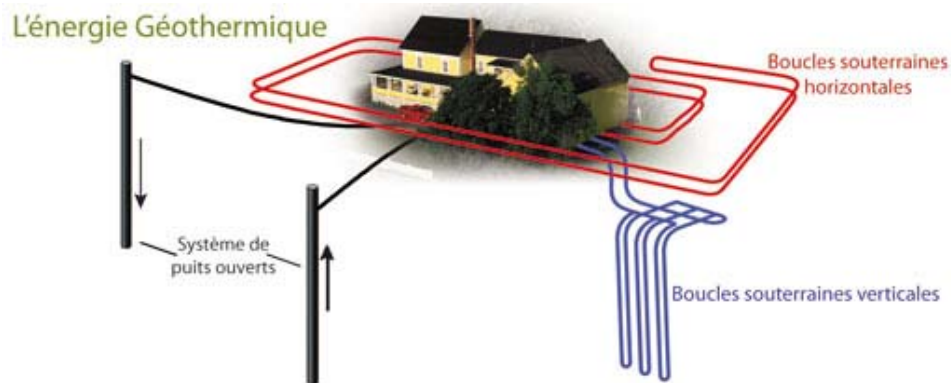
La technologie de l'énergie géothermique met à profit les propriétés de réchauffement et de refroidissement de la terre (ces propriétés qui font qu'un sous-sol reste frais en été et chaud en hiver) pour chauffer ou climatiser des bâtiments. Ce « transfert de chaleur » entre le sol et l'air

intérieur fait intervenir des technologies bien connues : celles de la thermopompe et du compresseur (Coalition canadienne de l'énergie géothermique, Internet).

Pour les deux systèmes géothermiques modélisés, il a été présumé que la boucle souterraine était verticale, en circuit fermé et alimentée par la chaleur du sol (Figure 2-1). Au Québec, ce type de systèmes serait prévalent dans 85 % des cas (Marcotte, 2009).

Selon le puisatier responsable de l'installation de la boucle souterraine, différents liquides caloporteurs sont utilisés. On retrouve au Québec le méthanol, le propylène glycol, l'éthylène glycol et l'éthanol, toujours à environ 30 % dans de l'eau (deminéralisée idéalement). Chaque substance vient avec ses avantages et inconvénients. Certaines sont plus toxiques ou inflammables, d'autres plus visqueuses (nécessitant une plus grande énergie de pompage) ou plus coûteuses (Fontaine, 2013).

D'après les puisatiers consultés (Veilleux, 2013; Massé, 2013), le méthanol est l'antigel qui est majoritairement utilisé dans le domaine résidentiel, notamment parce que les entreprises de climatisation qui se sont approprié ce secteur privilégient la performance énergétique du fluide caloporteur avant tout.



**Figure 2-1 : Types de puits géothermiques.**

Tiré de Géothermie Boréale (Internet).

En ce qui a trait à la composante de pompage (ou pompe à chaleur), deux options technologiques ont été retenues pour représenter le contexte résidentiel québécois (Rotondo, 2009), soit la pompe à chaleur liquide-air et la pompe à chaleur liquide-eau. Pour ces deux types de systèmes, la capacité nominale a été fixée à 10 kW (ou environ 3 tonnes), ce qui permet de répondre à la demande en chauffage d'une résidence d'au plus 180 m<sup>2</sup> de surface habitée (Géothermie Boréale, 2011). Il a été présumé que les pompes à chaleur offraient chacune 2 000 heures de service annuellement, pendant 20 ans (Heck, 2007). Ainsi, tel qu'ils ont été dimensionnés, les deux systèmes géothermiques produisent en moyenne 20 000 kWh (ou 72 000 MJ) par année (se référer au Tableau 2-5 de la section 2.6 pour plus de détail).

Dans l'ensemble, les hypothèses de dimensionnement des systèmes géothermiques ont été tirées des modules de données génériques *ecoinvent* disponibles (détail à la sous-section 2.6.1). Dans le cadre du présent mandat, l'étude suisse a servi de point de départ et d'arrière-plan pour la construction de modules de données représentatifs du contexte québécois. Les modules génériques ont majoritairement été adaptés à partir d'informations publiquement accessibles (en particulier, à partir des manuels techniques du fabricant québécois *Géothermie Boréale* (Internet)).



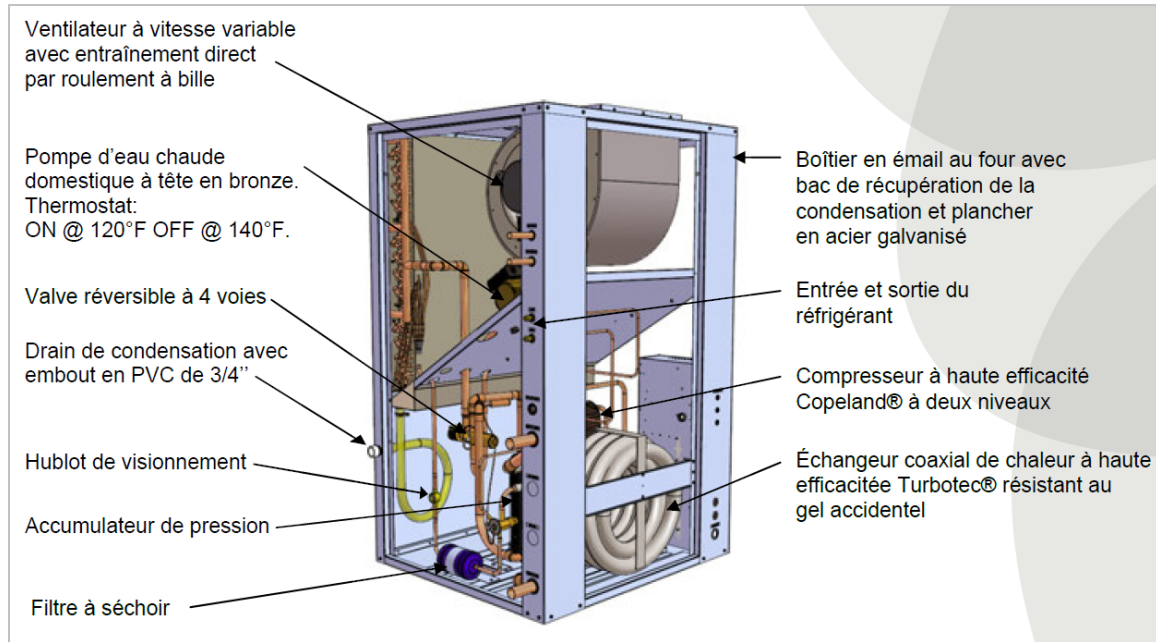
Notons par ailleurs qu'une approche alternative aurait pu être de sélectionner une pompe à chaleur ayant une capacité inférieure à 10 kW – soit celle incluse dans le modèle – avec un chauffage d'appoint électrique dans l'air pulsé. Ceci aurait permis de réduire l'ampleur de l'installation mécanique et probablement la taille de l'échangeur souterrain tout en fournissant l'essentiel des économies d'énergie. Cette stratégie de conception aurait probablement modifié le calcul d'inventaire. La modélisation d'une telle alternative aurait cependant nécessité une collecte de donnée spécifique approfondie, ce qui dépassait le cadre du mandat de l'étude.

#### 2.2.2.1 Pompe à chaleur liquide-air monobloc

Pour distribuer sa chaleur dans toutes les pièces de la maison, la thermopompe géothermique doit être couplée à un système de chauffage central. Dans le cas des systèmes liquide-air, on choisira un système à air pulsé (conduits de ventilation répartis à travers la résidence), qui offre également un régime de refroidissement permettant de climatiser l'air de la maison en été.

La pompe à chaleur liquide-air modélisée est inspirée des caractéristiques du produit Boréale<sup>MD</sup> AC-45 de Géothermie Boréale inc., telle qu'illustré à la Figure 2-2 (Géothermie Boréale, 2011). Ce système regroupe, à l'intérieur d'un caisson en acier inoxydable, un évaporateur (ou échangeur de chaleur primaire, liquide frigorigène), un compresseur, un condensateur (ou échangeur de chaleur secondaire, frigorigène-air), un panneau de branchement/commande, une pompe, un petit ventilateur à air soufflé, un filtre et un désurchauffeur. À l'extérieur du caisson est installé le module de pompage, qui fait circuler le liquide entre la boucle souterraine et la pompe à chaleur.

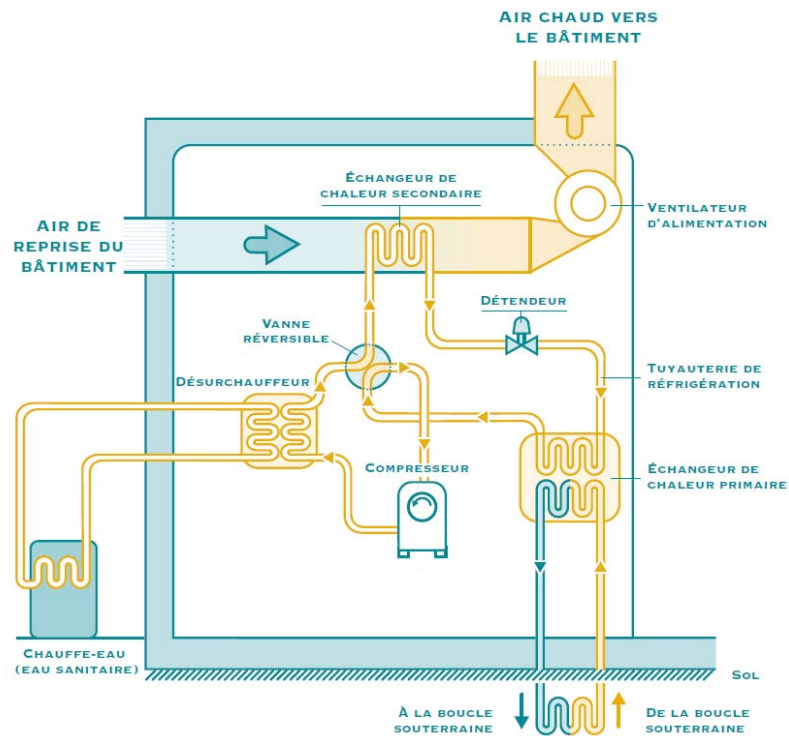
L'ajout du désurchauffeur dans la boucle permet la production d'une partie de l'eau chaude sanitaire. Quand le compresseur fonctionne, le désurchauffeur (un troisième échangeur de chaleur) transfère la chaleur excédentaire du gaz comprimé vers le réservoir d'eau de consommation, et sert ainsi de source d'énergie auxiliaire. Les quantités d'eau chaude sanitaire produites sont plus élevées lorsque la pompe fonctionne en régime de refroidissement (en été), du fait du plus grand excès de chaleur produite par le cycle. Dans le cadre de la présente étude, les analyses principales ont été réalisées en considérant uniquement le mode de chauffage. Par contre, une analyse de sensibilité incluant la climatisation a été réalisée.



**Figure 2-2 : Composantes principales de la pompe à chaleur liquide-air (modèle vertical) de la série AC de Boréale Géothermie.**

Tiré de Géothermie Boréale (2011, p.36).

La Figure 2-3 illustre de manière simplifiée le cycle thermodynamique d'une telle pompe à chaleur.



**Figure 2-3 : Schéma simplifié d'une pompe à chaleur liquide-air.**

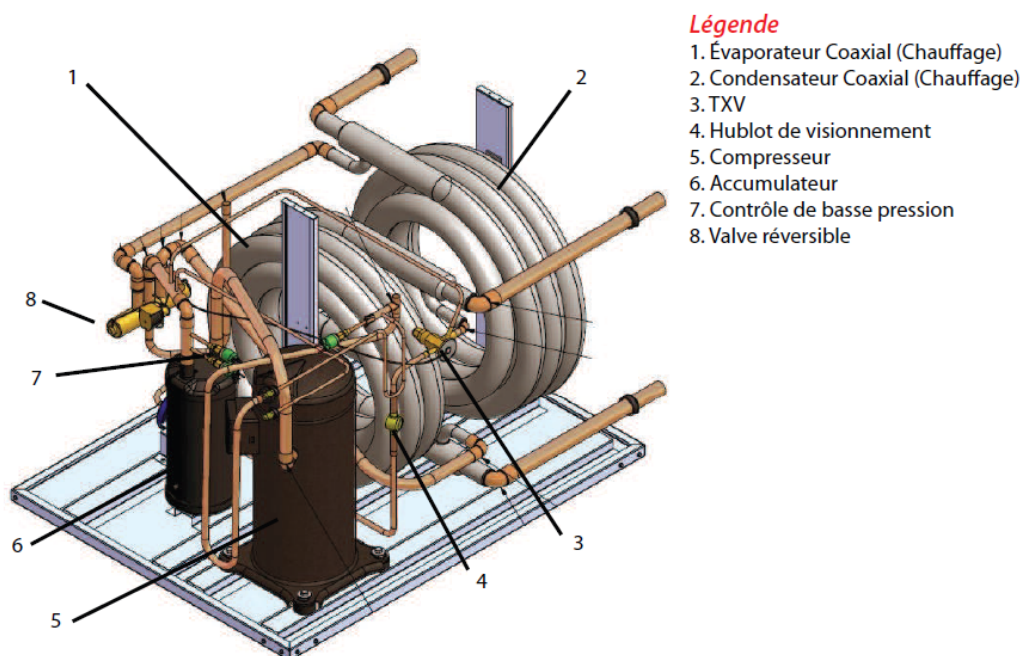
Tiré de CANMET (2002).

À la sortie de la pompe à chaleur, l'air chaud est poussé vers les espaces habités par un réseau de conduites d'air, de filtres et de sorties murales, par le travail du ventilateur.

#### 2.2.2.2 Pompe à chaleur liquide-eau (ou hydronique)

Dans ce type de système, la thermopompe géothermique est couplée à un système de chauffage central à eau chaude. La chaleur peut être transmise aux pièces de la maison grâce à des radiateurs muraux ou des planchers radiants. C'est cette dernière variante qui a été retenue pour l'analyse. Un tel système n'opère jamais en mode climatisation.

La pompe à chaleur liquide-eau modélisée regroupe, à l'intérieur d'un même caisson en acier inoxydable, un évaporateur (ou échangeur de chaleur primaire comprenant le liquide frigorigène), un compresseur, un condensateur (ou échangeur de chaleur secondaire frigorigène-eau), un panneau de branchement/commande, un circulateur de fluide (50 W) et un désurchauffeur. Comme pour le modèle précédent, un module de pompage, qui fait circuler le liquide entre la boucle souterraine et la pompe à chaleur, est installé à l'extérieur du caisson. Les caractéristiques du modèle employé reflètent celles du produit BoréaleMD HW-45 de Boréale Géothermie inc., tel qu'illustré à la Figure 2-4.



**Figure 2-4 : Composantes principales de la pompe à chaleur liquide-eau de la série W de Boréale Géothermie.**

Tiré de Géothermie Boréale (2009, p.32).

C'est à la sortie de la pompe à chaleur que l'eau chargée de chaleur est pompée vers un plancher radiant (essentiellement constitué de tuyaux de cuivre et de béton).

#### 2.2.3 Systèmes thermosolaires

Pour les systèmes solaires thermiques, deux options technologiques se sont présentées comme particulièrement pertinentes vis-à-vis du contexte résidentiel québécois. Selon une étude réalisée par Canmet ÉNERGIE (2010), 60 % des ventes canadiennes de **capteurs à circulation de**

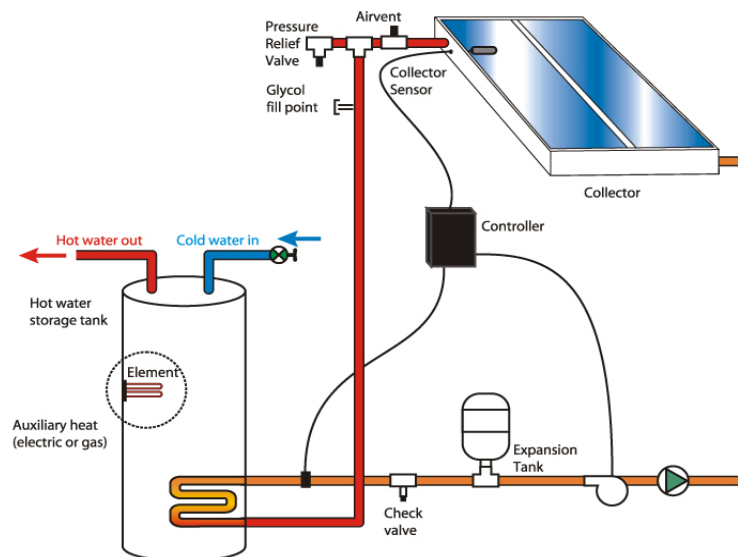
**liquide vitrés** (ou collecteurs plats) en 2009 ont été destinées au secteur résidentiel (contre 40 % pour le secteur des ICI (industries, commerces et institutions)). La quasi-totalité du volume de vente destiné au résidentiel (soit 97 %) a servi au chauffage d'eau de consommation domestique. Selon la même étude, 61 % des ventes canadiennes de **capteurs à circulation de liquide sous vide** (ou à tubes sous vide) ont été destinées au secteur résidentiel en 2009. De ce dernier volume, 69 % a servi au chauffage d'eau de consommation domestique, 10 % au chauffage des espaces et 21 % au chauffage combiné de l'eau et des espaces.

À la lumière de ces constats, un modèle de système à base de collecteurs plats, destiné exclusivement au chauffage de l'eau de consommation, a été réalisé; un autre système, à base de collecteurs à tubes sous vide, a été réalisé de manière à contribuer à la fois au chauffage de l'eau de consommation et au chauffage des espaces habités.

Un troisième système à base de capteurs à air vitrés a également été ajouté à l'étude. Celui-ci contribue au chauffage des espaces habités, sans toutefois contribuer au chauffage de l'eau de consommation. Bien qu'encore peu répandu dans le secteur résidentiel ou des ICI, ce type de système semble présenter des perspectives intéressantes de croissance et un intérêt particulier du point de vue environnemental (SAIC Canada, 2009).

#### 2.2.3.1 Système thermosolaire à collecteurs plats

Le système modélisé est constitué d'une surface de captage de 6 m<sup>2</sup> (installé sur un toit), d'une pompe (40W), d'un réservoir d'expansion (25 litres) et de deux réservoirs à eau chaude (227 litres chacun) munis d'un échangeur de chaleur. Les composantes sont connectées entre elles par des tuyaux en cuivre ou en acier. Un liquide caloporteur circule entre les capteurs et l'échangeur de chaleur (situé à l'intérieur du réservoir à eau chaude). Les conduites extérieures sont isolées afin que soient limitées les pertes de chaleur. La Figure 2-5 illustre le principe général de fonctionnement d'un tel système.



**Figure 2-5 : Composantes principales d'un système solaire thermique en circuit fermé pour le chauffage de l'eau sanitaire.**

Tiré de SolarTherm Technologies (Internet).

Tel que l'illustre la Figure 2-6, chaque unité de captage comprend un boîtier (principalement en aluminium), un isolant (laine minérale), une plaque absorbante, une vitre en verre solaire (qui surplombe la plaque), une entrée pour le liquide « froid », et une sortie pour le liquide chargé de chaleur. La pompe assure la circulation du liquide caloporteur (12 litres) à l'intérieur du circuit, entre les capteurs et le réservoir.



**Figure 2-6 : Composantes principales d'un capteur solaire plat (vitré, à circulation de fluide).**

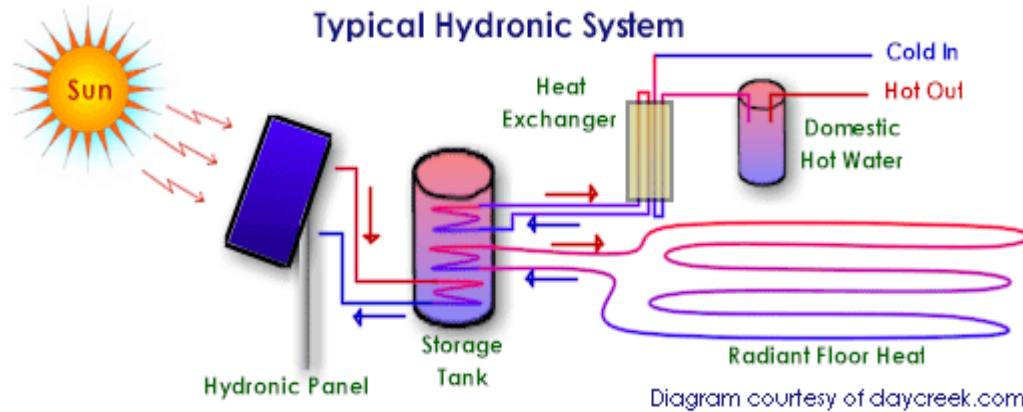
Tiré de Heliofrance (Internet).

Selon la simulation de rendement associé au système, une telle installation (destinée au chauffage de l'eau sanitaire) générerait environ 7 765 MJ/an (soit 2 157 kWh/an ou 539 kWh/m<sup>2</sup>.année) pendant 25 ans.

#### 2.2.3.2 Système thermosolaire à tubes sous vide

Le système modélisé est constitué d'une surface de captage de 10,5 m<sup>2</sup> (installé sur un toit), d'une pompe (50W), d'un réservoir d'expansion (25 litres) et d'un réservoir à eau chaude (2 000 litres) muni d'un échangeur de chaleur. Un liquide caloporteur circule entre les capteurs et l'échangeur de chaleur (situé à l'intérieur du réservoir à eau chaude). Les composantes du système sont connectées entre elles par des tuyaux en cuivre ou en acier, et un plancher radiant sert à dissiper la chaleur dans les espaces habités. Un tel système permet également de chauffer l'eau sanitaire (voir Figure 2-7). Les conduites extérieures (entre les capteurs et l'intérieur du bâtiment) sont isolées afin que soient limitées les pertes de chaleur.

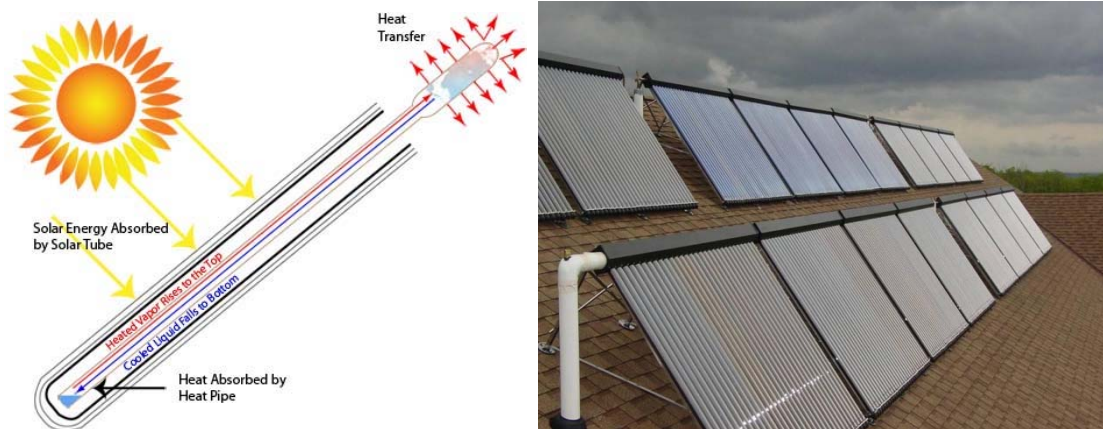
Tel que l'illustre la Figure 2-8, chaque unité de captage est constituée d'un assemblage de tubes en verre (borosilicate) fermé sous vide au centre desquels se trouve le collecteur concentrique et l'échangeur de chaleur (caloduc); d'une couche absorbante posée sur un support en cuivre; d'un isolant (laine minérale); d'une entrée pour le liquide « froid »; et d'une sortie pour le liquide chargé de chaleur. La pompe assure la circulation du liquide caloporteur (38 litres) à l'intérieur du circuit, entre les capteurs et le réservoir à eau chaude.



**Figure 2-7 : Composantes principales d'un système solaire thermique à tubes sous vide pour le chauffage de l'eau sanitaire et des aires habitées.**

Tiré de Daycreek.com (Internet).

Selon la simulation de rendement associé au système, une telle installation (destinée au chauffage des espaces habités et de l'eau sanitaire) générerait environ 18 745 MJ/an (soit 5 207 kWh/an ou 496 kWh/m<sup>2</sup>.année) pendant 25 ans.



**Figure 2-8 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire à tubes sous vide.**

Tiré de Solar Panels Plus (Internet).

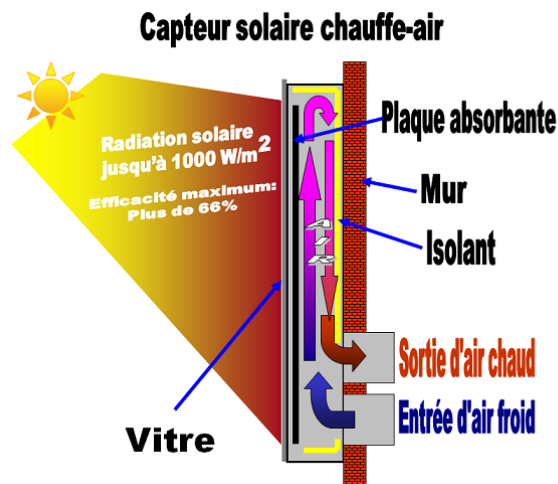
### 2.2.3.3 Système thermosolaire à collecteurs à air vitrés

Le système modélisé peut être constitué d'un nombre variable d'unités de captage. Pour la présente étude, deux capteurs d'une superficie de 5,2 m<sup>2</sup> et d'une capacité annuelle moyenne de 1 500 kWh/unité ont été considérés, pour une production totale de 10 800 MJ/an (ou 3 000 kWh/an).

Chaque unité de captage comprend un boîtier (principalement en aluminium), un isolant, une plaque absorbante, une vitre en verre extra clair trempé (qui surplombe la plaque), une entrée d'air froid munie d'un filtre, et une sortie d'air chaud. Un ventilateur à la sortie permet de faciliter la circulation de l'air à l'intérieur du capteur et vers les espaces habités.

La Figure 2-9 illustre le principe de fonctionnement d'un tel capteur solaire.

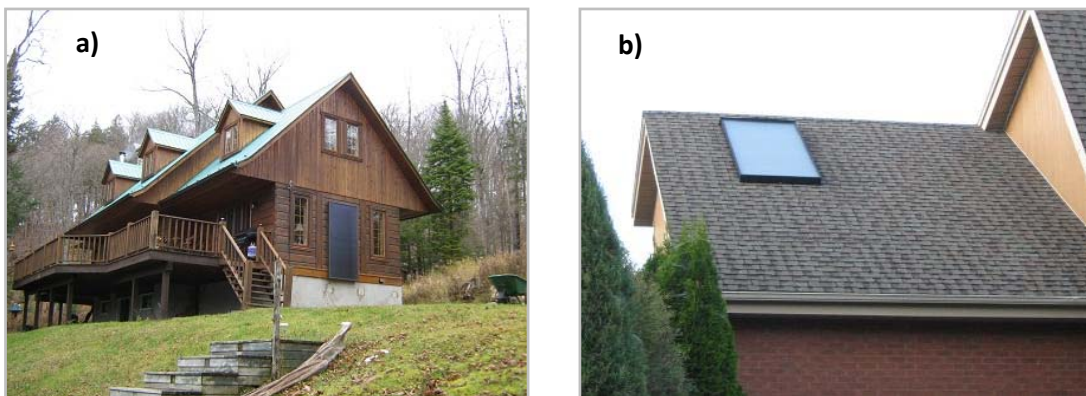




**Figure 2-9 : Principe général de fonctionnement d'un capteur solaire à air (modèle ESOLAIR 2.0 de MC<sup>2</sup> Énergie).**

Tiré de MC<sup>2</sup> Énergie (Internet).

Bien qu'il puisse être placé sur un toit (à un angle supérieur à 45 degrés), il a été présumé que les capteurs sont installés sur un mur extérieur orienté vers le sud (configuration optimale, telle qu'illustré à la Figure 2-10 a). Une telle configuration peut générer un rendement maximal de 66 %.



**Figure 2-10 : Exemples d'installations d'un capteur solaire à air (modèle ESOLAIR 2.0 de MC<sup>2</sup> Énergie) : a) installation murale, b) installation sur un toit en pente.**

Tiré de MC<sup>2</sup> Énergie (Internet).

### 2.3 Fonction et unité fonctionnelle

La fonction des technologies de production d'énergie thermique étudiées consiste à « *produire de l'énergie thermique se destinant au chauffage de l'air ou de l'eau sanitaire* ».

Un des systèmes géothermiques à l'étude permet également de refroidir les espaces habités en saison chaude. L'évaluation de cette fonction de climatisation a été incluse en analyse de sensibilité.

L'**unité fonctionnelle**, c'est-à-dire la référence à laquelle se rapportent les calculs d'inventaire et d'évaluation des impacts, se définit comme suit :

*« Produire 1 mégajoule (MJ) d'énergie thermique se destinant soit au chauffage des espaces ou à celui de l'eau sanitaire, au Québec en 2011 ».*

Les systèmes permettant de répondre à cette fonction sont, pour les technologies étudiées :

- **Système 1** : Géothermie liquide-air – chauffage de l'air et de l'eau.
- **Système 2** : Géothermie liquide-eau – chauffage de l'air et de l'eau.
- **Système 3** : Thermosolaire à collecteurs plats – chauffage de l'eau.
- **Système 4** : Thermosolaire à tubes sous vide – chauffage de l'air et de l'eau.
- **Système 5** : Thermosolaire à collecteurs à air vitrés – chauffage de l'air.
- **Système de référence** : Plinthes électriques de 1 000 W pour le chauffage de l'air et chauffe-eau électrique pour le chauffage de l'eau.

Les **flux de référence** font appel à la quantité de produits nécessaires pour remplir la fonction étudiée. Considérant la performance technique de chacun des systèmes, le nombre de chaque système permettant de remplir l'unité fonctionnelle (en unité/MJ) a été estimé (Tableau 2-1). Tous les besoins en matières et en énergie sur la période d'étude y sont inclus. Le détail des flux entrants et sortants considérés est fourni à l'Annexe C.



**Tableau 2-1 : Caractéristiques de performance et flux de référence**

Système	Performance	Durées de vie des composantes	Flux de référence
1. Géothermie liquide-air	Durée de vie globale : 50 ans Rendement total : $3,6 \times 10^6$ MJ ( $1 \times 10^6$ kWh) $COP_h$ : 3,5	Boucle souterraine (et fluide caloporteur) : 50 ans Pompe à chaleur : 20 ans Plancher radiant : 50 ans Réservoir à eau : 12 ans.	$2,78 \times 10^{-7}$ unité/MJ
2. Géothermie liquide-eau	Durée de vie globale : 50 ans Rendement total : $3,6 \times 10^6$ MJ ( $1 \times 10^6$ kWh) $COP_h$ : 3,9	Boucle souterraine (et fluide caloporteur) : 50 ans Pompe à chaleur : 20 ans Ventilation (conduites) : 50 ans Filtres à air : 2 ans Ventilateur (air pulsé) : 20 ans Réservoir à eau : 12 ans.	$2,78 \times 10^{-7}$ unité/MJ
3. Thermosolaire à collecteurs plats	Durée de vie globale : 25 ans Rendement total : 194 166 MJ (53 935 kWh)	Capteurs solaires : 25 ans Liquide caloporteur : 10 ans Pompe d'expansion : 10 ans Réservoir d'expansion : 25 ans Réservoir et chauffe-eau : 12 ans	$5,15 \times 10^{-6}$ unité/MJ
4. Thermosolaire à tubes sous vide	Durée de vie globale : 25 ans Rendement total : 468 597 MJ (130 165 kWh)	Capteurs solaires : 25 ans Liquide caloporteur : 10 ans Pompe d'expansion : 10 ans Réservoir d'expansion : 25 ans Plancher radiant : 50 ans Réservoir chauffant : 12 ans	$2,13 \times 10^{-6}$ unité/MJ
5. Thermosolaire à collecteurs à air vitrés	Durée de vie globale : 37,5 ans Rendement total : 405 000 MJ (112 500 kWh)	Capteurs à air vitrés : 37,5 ans Système de ventilation : 50 ans Filtres à air : 2 ans Contrôleur différentiel : 37,5 ans	$2,47 \times 10^{-6}$ unité/MJ
Référence : Plinthes électriques, 1000 W et chauffe-eau électrique, 60 gallons	Durée de vie globale : 25 ans 16 plinthes pour une résidence de 150 m <sup>2</sup>	a) Plinthes électriques : 25 ans b) Chauffe-eau : 12 ans	a) $1,2 \times 10^{-5}$ unité/MJ b) $3,46 \times 10^{-6}$ unité/MJ

Rendement total : quantité totale d'énergie thermique que le système fournit sur sa durée de vie.

COP : Rapport de la puissance frigorifique à la puissance absorbée, les deux grandeurs étant exprimées dans les mêmes unités et pendant la même période de temps (Termium Plus, Internet). Il se calcule en divisant l'énergie dégagée ( $Q_{\text{sortant}}$ ) par la consommation d'énergie ( $W_{\text{entrant}}$ ).

Flux de référence : les quantités présentées représentent la fraction de chaque système attribuable à la production de 1 MJ d'énergie thermique.

## 2.4 Traitement des fonctions secondaires et règles d'imputation

L'ACV ne porte pas sur la comparaison de produits ou services spécifiques, mais bien sur une ou plusieurs fonctions remplies par ces produits ou services. En conséquence, les processus multifonctionnels doivent être considérés avec précaution.

- **Chauffage et climatisation** : Le système géothermique liquide-air peut climatiser l'air d'une résidence en plus de le chauffer. Cette seconde fonction est automatiquement incluse et ne requière aucun changement à l'infrastructure de la machine. Dans un

premier temps, puisque c'est le seul des systèmes évalués à offrir cette seconde fonction, la climatisation a été exclue de l'analyse principale. De ce fait, aucune imputation n'a été effectuée entre les deux fonctions et tous les impacts potentiels associés au cycle de vie de ces systèmes ont été attribués à la fonction de chauffage. Une analyse de sensibilité incluant la climatisation a par ailleurs été réalisée. Dans ce cas, seule l'opération supplémentaire de la machine a été imputée à la fonction de climatisation.

- **Chauffage de l'air et de l'eau :** Les systèmes géothermiques et le système solaire thermique à tubes sous vide permettent de chauffer à la fois l'air et l'eau sanitaire.

En ce qui a trait aux systèmes géothermiques, il a été considéré que 95 % de chaque mégajoule produit par l'un ou l'autre des systèmes géothermiques se destine au chauffage de l'air, le restant allant au chauffage de l'eau sanitaire. Le réservoir à eau chaude constitue la seule composante des systèmes géothermiques dont la fonction se lie uniquement au chauffage de l'eau. Pour plus de détails sur les calculs qui sous-tendent l'imputation, se référer à l'annexe C.

En ce qui concerne le système solaire à collecteurs à tubes sous vide, l'ensemble des composantes (incluant le réservoir d'eau sanitaire) a un rôle à jouer dans le chauffage à la fois de l'eau et de l'air. Aucune imputation n'a donc été nécessaire : l'ensemble des impacts associés aux cycles de vie des composantes du système a été attribué au système.

## 2.5 Frontières des systèmes

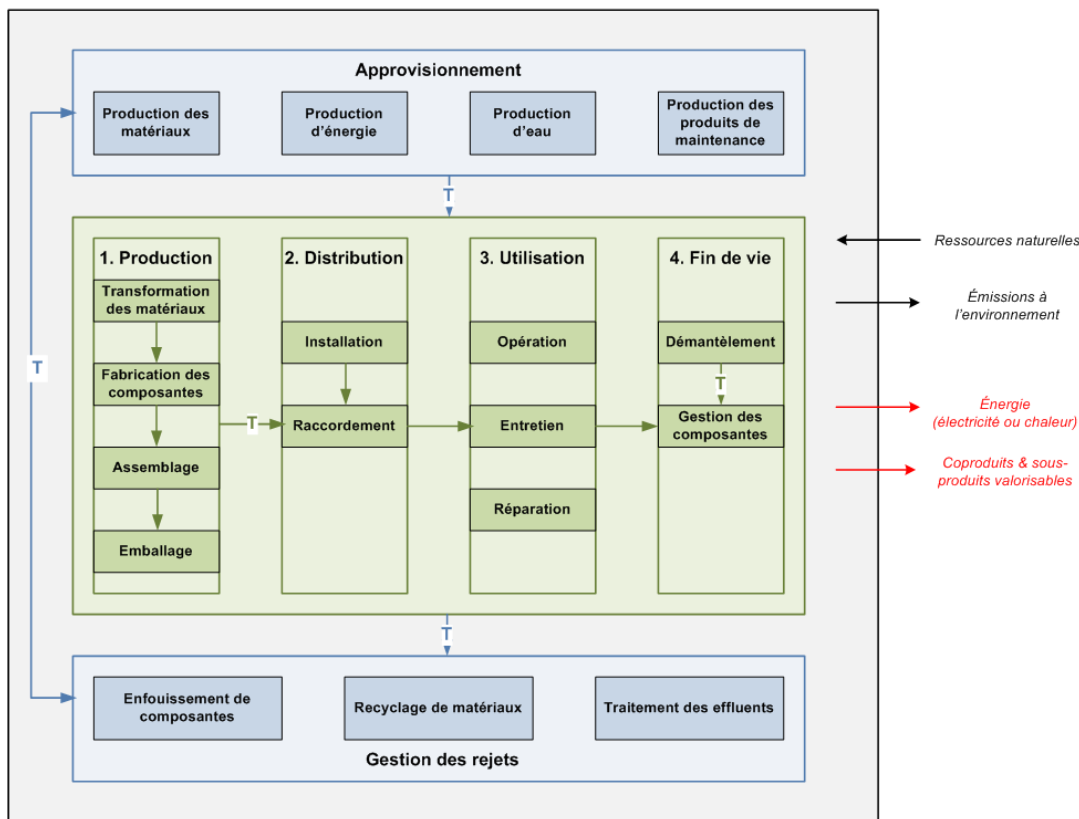
Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux qui seront considérés dans l'ACV. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée.

Les sous-sections qui suivent présentent une description générale des frontières des systèmes, ainsi que les considérations géographiques et temporelles associées.

### 2.5.1 Processus inclus dans les systèmes évalués

La Figure 2-11 schématise les frontières générales des systèmes étudiés. Elles incluent la production, le transport et l'installation des composantes des systèmes, leur utilisation pour produire l'énergie thermique et leur fin de vie.

Le détail des systèmes (quantification des flux et processus) est quant à lui fourni à l'Annexe C du présent rapport.



**Figure 2-11 : Frontières générales des systèmes à l'étude.**

Le sous-système « **production** » touche à la fabrication des composantes de la technologie de production d'énergie, et du système associé. Il inclut ici la « pré-production », c'est-à-dire la production de tous les matériaux et emballages nécessaires à l'étape de production, et à leur livraison au site de production. L'emballage des composantes, les infrastructures et l'opération des équipements de production sont également inclus. À l'issue de l'étape de production, il n'est donc pas question d'un produit fini, mais bien de plusieurs assemblages partiels de composantes et de matériaux de construction.

Le sous-système « **distribution** » vise les transports des composantes, de leur lieu de production jusqu'au détaillant, puis du détaillant vers le lieu d'installation (c.-à.-d. la résidence). Il inclut également les travaux liés à l'installation des systèmes par les ouvriers.

Les sous-systèmes « **utilisation** » et « **fin de vie** » concernent respectivement l'utilisation et l'entretien des systèmes et l'élimination des composantes à la fin de leurs vies utiles, incluant tous les transports vers la résidence (pour l'entretien) et celui des composantes usagées vers le lieu d'élimination ou de gestion finale.

Enfin, les sous-systèmes « **approvisionnement** » et « **gestion des rejets** » concernent respectivement, pour chacun des quatre sous-systèmes précédents, toutes les activités reliées :

- À l'approvisionnement en ressources (eau, énergie, produits chimiques, matériaux), comprenant l'extraction, le traitement et la transformation des ressources naturelles, de même que les différents transports requis jusqu'à l'arrivée aux sites d'utilisation des ressources (c.-à-d. les sites de pré-production, production, distribution, utilisation et de gestion en fin de vie).
- Au transport et au traitement des déchets générés à l'une ou l'autre de ces étapes du cycle de vie.

Dans tous les sous-systèmes, les processus d'« amont » identifiables sont inclus de manière à fournir la vue la plus complète possible du système. Par exemple, dans le cas de l'énergie utilisée pour un transport, non seulement les émissions liées à la combustion de carburant sont considérées, mais aussi les processus et matières nécessaires à la production de ce carburant. De cette manière, les chaînes de production de tous les entrants sont remontées jusqu'à l'extraction des matières premières.

Les processus et flux inclus et exclus de l'analyse sont résumés au Tableau 2-2. L'approvisionnement et la gestion des rejets ont été répartis entre les étapes du cycle de vie afin de simplifier la lecture du tableau.

**Tableau 2-2 : Processus inclus et exclus des systèmes**

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Commentaires
<b>Production</b>	Fabrication des composantes des systèmes géothermiques : c.-à.-d. la boucle souterraine, la pompe à chaleur et le système de distribution de la chaleur dans la résidence (plancher radiant ou système de ventilation).	Production et transport des principaux composants/matériaux et emballages inclus <i>Les autres ressources et rejets sont exclus.</i>
	Fabrication des composantes des systèmes solaires : c.-à.-d. l'unité de captage, un réservoir (s'il y a lieu) et le système de distribution de la chaleur dans la résidence (plancher radiant ou système de ventilation).	
	Fabrication des plinthes et du chauffe-eau électrique pour le système de référence.	
	Emballage.	
	Opération de fabrication sur les différents sites de production.	Consommation d'électricité et d'eau et émissions directes à l'environnement incluses.
	<i>Réseau de tuyauterie pour l'acheminement de l'eau sanitaire.</i>	<i>Exclues des frontières de l'étude, car commun à tous les systèmes.</i>
<b>Distribution</b>	Transport du lieu de production à la résidence.	Inclus.
	<i>Manutention et entreposage chez l'installateur.</i>	<i>Exclus (données non disponibles).</i>
	Installation.	Incluse. Selon les systèmes, peut comprendre le forage des puits géothermiques (opération des équipements, transport et gestion des résidus, usure des mèches) ou le raccordement des systèmes solaires (tuyauterie).

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Commentaires
Utilisation	Opération/utilisation en mode chauffage	Consommation d'électricité et émissions directes à l'environnement (par exemple fuites de gaz frigorigène). <i>La consommation d'eau du réseau d'aqueduc est exclue, car identique pour tous les systèmes évalués.</i>
	Opération/utilisation en mode climatisation	<i>Inclus en analyse de sensibilité.</i>
	Entretien et réparation	Comprenant le transport et les matériaux pour l'entretien : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Changement de filtres pour les systèmes à air pulsé ;</li> <li>- Remplacement de composantes dont la durée de vie est inférieure à celle du système ;</li> <li>- Remplacement du liquide caloporteur pour les systèmes solaires ;</li> <li>- Ajout de gaz frigorigène (pour compenser les émissions fugitives).</li> </ul>
Fin de vie	Démantèlement et transport vers les lieux de gestion en fin de vie	Transport des composantes usagées au lieu d'élimination/gestion finale inclus.
	Gestion en fin de vie des composantes	<i>Recyclage des métaux exclus (considéré comme faisant partie d'un autre système, approche cut-off).</i> Enfouissement des plastiques et autres matériaux inclus. Les boucles souterraines de plastique (HDPE) sont laissées en place et considérées sans impact. Il est considéré que le fluide caloporteur qu'elles contiennent (méthanol et eau) est éventuellement émis au sol <sup>4</sup> .

Il est à noter qu'aucun critère d'inclusion ou de coupure n'a été appliqué pour la présente étude : toutes les données disponibles ont été intégrées au modèle.

Tel que présenté au Tableau 2-2, certains processus ont été exclus à cause d'un manque de données. Il n'est par ailleurs pas possible de connaître l'effet de l'inclusion de ces éléments sur les résultats.

<sup>4</sup> Les systèmes géothermiques sont encore trop récents pour que leur mode de démantèlement soit connu. Si les puisatiers consultés (Massé, 2013; Veilleux, 2013) s'entendent pour dire que la boucle souterraine risque d'être laissée en place, il est plus incertain de comment sera géré le liquide caloporteur qu'elle contient. Comme il n'existe à l'heure actuelle aucune réglementation obligeant le propriétaire à gérer le fluide caloporteur d'une manière particulière, les options possibles sont de : laisser le fluide en place dans la boucle et l'obturer; pomper le liquide et l'envoyer se faire traiter/recycler par une entreprise spécialisée; rejeter le liquide à l'égout. Pour des raisons de coûts et de simplicité, il a été présumé que le liquide caloporteur serait laissé en place dans la boucle souterraine. Ainsi, le méthanol est présumé émis entièrement au sol (dans un horizon de temps plus ou moins long).

### 2.5.2 Frontières géographiques et temporelles

Conformément à l'unité fonctionnelle sélectionnée, la présente étude constitue une ACV représentative du contexte québécois en 2011. Bien que certaines données datent d'années antérieures, il a été jugé qu'elles étaient pertinentes pour représenter les systèmes à l'étude. Ainsi, les activités associées à la production, aux transports, à l'installation, à l'exploitation et au démantèlement en fin de vie ont autant que possible été modélisées de manière à répondre à ce critère.

Par ailleurs, il est à noter que certains processus compris dans les frontières des systèmes peuvent avoir lieu n'importe où ou à n'importe quel moment s'ils sont nécessaires à la réalisation de l'unité fonctionnelle. Par exemple, les processus associés à l'approvisionnement en matières premières, ainsi qu'à la gestion des rejets générés peuvent avoir lieu au Québec ou ailleurs dans le monde. De plus, certains processus peuvent générer des émissions sur une plus longue période que l'année de référence. C'est le cas de l'enfouissement des déchets, qui engendre des émissions (biogaz et lixiviats) sur une période de temps dont la longueur (de quelques décennies à plus d'un siècle, voire des millénaires) dépend de la conception et des paramètres d'opération des cellules d'enfouissement et de la modélisation de leurs émissions dans l'environnement.

## 2.6 Sources, hypothèses et données d'inventaire du cycle de vie (ICV)

Les données requises à l'ACV concernent les matières premières utilisées, l'énergie consommée ainsi que les rejets générés à chaque étape du cycle de vie étudié.

Comme cette étude a pour but de fournir des données environnementales quant à différents systèmes génériques de production décentralisée d'énergie thermique, elle a été réalisée à partir de **données secondaires** (c.-à-d. des données génériques ou théoriques issues de banques de données commerciales ou de la banque de données du CIRAIG, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études diverses, ou d'autres sources publiées (voir Tableau 2-6)). Dans tous les cas, les données sélectionnées sont représentatives de systèmes de production décentralisée d'énergie thermique appliqués au Québec, sans pour autant couvrir toutes les options disponibles sur le territoire.

Tous les systèmes ont été modélisés à l'aide des modules de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponibles dans la banque *ecoinvent* version 2.1 ([www.ecoinvent.ch/](http://www.ecoinvent.ch/)). Cette base de données européenne est particulièrement reconnue par la communauté scientifique internationale, car elle surpasse de loin les autres bases de données commerciales tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.).

L'utilisation de données européennes pour représenter l'Amérique du Nord peut introduire un biais dans certains cas. Cependant, il est estimé que la cohérence et la complétude de cette base de données en font une option préférable à d'autres données disponibles pour la plupart des processus.

En outre, bien qu'*ecoinvent* soit d'origine européenne, elle contient des informations qui représentent plusieurs régions du monde. Par exemple, pour toutes les activités ayant lieu au Québec, les modules génériques ont été adaptés en remplaçant les mélanges d'approvisionnement énergétique (*grid mix*) européens par :

- Le *grid mix* québécois 2011 (incluant les achats et les importations, Hydro-Québec, 2011) pour les processus d'avant-plan, c.-à-d. la consommation d'électricité en phase d'exploitation des systèmes de production d'énergie décentralisée ;
- Le *grid mix* nord-américain pour tous les processus d'arrière-plan, c.-à-d. tous les processus directement et indirectement liés aux processus d'avant-plan (par exemple, la production des composantes, des emballages, etc.). Le *grid mix* nord-américain est ici plus approprié considérant que l'approvisionnement peut avoir lieu n'importe où, et plus probablement en Amérique du Nord.

Ainsi, tous les processus d'avant-plan ayant lieu au Québec (incluant les divers transports) font appel à des processus d'arrière-plan adaptés au contexte énergétique nord-américain. Le Tableau 2-3 présente le détail des *grid mix* utilisés.

**Tableau 2-3 : Mélanges d'approvisionnement énergétique utilisés**

Mode de génération électrique	Québec	Amérique du Nord
Charbon	0,35 %	44,7 %
Pétrole	0,02 %	4,4 %
Gaz naturel	0,19 %	17,3 %
Nucléaire	2,37 %	19,3 %
Hydroélectrique	95,73 %	13,6 %
Éolien	0,74 %	0,3 %
Biomasse	0,51 %	< 0,1 %
Biogaz / déchets	< 0,1 %	< 0,1 %
Photovoltaïque	< 0,1 %	< 0,1 %

Le total peut différer de 100 % à cause de l'arrondissement. Les modes de génération électriques pour lesquels la fraction indiquée est < 0,1 % ont été négligés dans la modélisation.

L'électricité à la prise du réseau d'Hydro-Québec a été modélisée en y incluant les éléments décrits au Tableau 2-4. Elle comprend à la fois l'énergie produite par Hydro-Québec, l'électricité achetée de producteurs privés et les importations associées au marché.

**Tableau 2-4 : Processus inclus dans la modélisation du mélange d’approvisionnement québécois (kWh d’Hydro-Québec)**

Étapes du cycle de vie	Processus/Sous-processus	Commentaires
<b>Production, achats et importation d’électricité</b> (selon <i>grid mix</i> détaillé au Tableau 2-3)	Construction des infrastructures.	Production et transport des matériaux et de l’énergie inclus.
	Opération des installations.	Matières entrantes et émissions générées lors de l’opération des équipements de production d’électricité incluses.
	Fin de vie des infrastructures.	Incluse.
<b>Transmission d’électricité</b> (haute et moyenne tension)	Construction des infrastructures.	Production et transport des matériaux et de l’énergie inclus.
	Opération des installations.	Haute tension : inclut les émissions à l’air (ozone et N <sub>2</sub> O) pendant la transmission et 1 % de pertes en ligne. Moyenne tension : inclut la consommation et les émissions à l’air de SF <sub>6</sub> pendant la transmission et 1 % de pertes en ligne.
	Fin de vie des infrastructures.	Incluse.
<b>Distribution d’électricité</b> (basse tension)	Construction des infrastructures.	Production et transport des matériaux et de l’énergie inclus.
	Opération des installations.	Inclut la consommation et les émissions à l’air de SF <sub>6</sub> pendant la transmission et 5,5 % de pertes en ligne, soit les valeurs les plus récentes pour Hydro-Québec.
	Fin de vie des infrastructures.	Incluse.

### 2.6.1 Données ecoinvent

Une part importante du travail associé à la construction de l’inventaire a donc été de décortiquer, de valider et d’adapter les données génériques de la banque de données *ecoinvent* (représentative du contexte suisse) de sorte qu’elles reflètent le plus fidèlement possible la réalité et les particularités du contexte québécois. Cette manière de procéder a eu pour effet de maximiser l’uniformité et la cohérence des données utilisées pour la modélisation.

Les données génériques *ecoinvent* ayant servi à modéliser les systèmes à l’étude sont le résultat d’études terrains ou de simulation de rendement. Pour la **filière géothermique**, une étude terrain échelonnée sur 4 ans (entre 1998 et 2002) a permis de déterminer le rendement attendu ou le coefficient de performance (COP) de la technologie de thermopompes à l’étude (Heck, 2007). Dans le cadre de cette étude, des systèmes géothermiques résidentiels ont été installés dans de nouvelles constructions au cours de l’année 1998 et leur performance a été analysée dans le temps. Les systèmes géothermiques étudiés étaient aptes à combler 100 % des besoins en eau chaude et en air chaud d’une résidence unifamiliale suisse typique. Les données recueillies au terme de l’étude ont été extrapolées pour une durée de vie totale estimée de 50 ans, afin que le rendement total puisse être corrélé au cycle de vie entier du système.

Quant aux données génériques à la base de l’analyse de la **filière solaire thermique**, des modèles de systèmes solaires résidentiels complets ont été construits par une équipe de



chercheurs de l'Université Rapperswil en Suisse. Les installations ont servi à simuler et à évaluer sur des périodes de 2 000 et 2 300 heures respectivement le rendement de deux technologies de captage des rayons solaires : 1) un système à collecteurs plats et 2) un système à tubes sous vide. Selon la documentation fournie par *ecoinvent*, les deux technologies sont aptes à combler entre 30 et 40 % des besoins en eau chaude et/ou en air chaud d'une résidence unifamiliale suisse typique. Les données recueillies au terme de la simulation ont été extrapolées pour une durée de vie totale estimée de 25 ans, afin que le rendement total puisse être corrélé au cycle de vie entier de tels systèmes. Une irradiation moyenne de 1 093 kWh/m<sup>2</sup>.an (ou 3 kWh/m<sup>2</sup>.jour) a été considérée par *ecoinvent*.

### 2.6.2 Autres données collectées

Afin de valider le contenu et l'applicabilité des données *ecoinvent* au contexte de l'étude, d'autres sources de données ont été employées. Ces données ont notamment été collectées auprès de manufacturiers présents sur le marché québécois des technologies d'énergies renouvelables et de chercheurs spécialisés dans l'une ou l'autre des filières à l'étude. Le processus de collecte a été assuré par l'entremise de questions techniques (transmises par voie électronique) et de discussions téléphoniques. Les informations demandées visaient à obtenir des statistiques quant aux configurations dominantes pour chaque système, des listes de matériaux et des spécifications techniques, ainsi qu'un portrait des étapes de fabrication, de distribution et d'installation pour les technologies à l'étude.

La stratégie de recherche a consisté à identifier et quantifier la configuration et les caractéristiques de performance les plus communes dans les **systèmes géothermiques** au Québec. À partir des configurations dominantes, des modèles spécifiques ont été sélectionnés pour représenter les systèmes génériques (présentés à la sous-section 2.2.2), de manière à valider et adapter les données génériques.

Pour ce qui est des **systèmes thermosolaires**, les caractéristiques de performance sont très variables d'une installation à l'autre, et ce, même pour des systèmes de configuration identiques, à cause de la grande diversité de composantes disponibles (notamment de panneaux solaires). Les caractéristiques de performances d'un système thermosolaire ne peuvent donc pas être facilement corrélées à un type de configuration en particulier. Afin de contourner cette difficulté, les modèles technologiques européens de collecteurs solaires disponibles dans *ecoinvent* ont été conservés quasi tels quels, et leurs paramètres clés ont été testés en analyses de sensibilité. Les deux modèles de collecteurs solaires fournis par *ecoinvent* ne présentent a priori aucun attribut ou caractéristique technologique hors du commun. Bien que dans une moindre proportion qu'en Europe ou en Asie, des équivalents technologiques sont actuellement disponibles sur les marchés québécois et canadien (SAIC, 2009; Weiss *et coll.*, 2006).

Le système ainsi modélisé a été jugé applicable à la situation québécoise, puisque les technologies vendues au Québec sont sensiblement les mêmes et que l'irradiation considérée correspond à un ensoleillement assez modéré pour le Québec. En effet, selon les régions, le rayonnement solaire annuel moyen varie de 2,93 à 3,80 kWh/m<sup>2</sup>.jour. Le rayonnement le plus faible, mesuré à Blanc-Sablon, est de 1 069 kWh/m<sup>2</sup>.an selon les données incluses dans le logiciel RETScreen (Ressources naturelles Canada, Internet).

Enfin, le système solaire thermique à collecteurs à air a été modélisé à partir des données primaires rendues disponibles par MC<sup>2</sup> Énergie, concepteur et fabricant québécois de panneaux solaires à air.

### 2.6.3 Hypothèses

Dans les cas où aucune source n'était disponible, des **hypothèses** ont aussi été posées. Il est notamment posé que pour une configuration et une performance données, les modèles de systèmes géothermiques résidentiels offerts par les différents installateurs québécois sont relativement équivalents. Les hypothèses sont détaillées au Tableau 2-5 et à l'Annexe C.

Mentionnons aussi que pour tous les systèmes étudiés les données utilisées ont été :

- 1) Évaluées quant à leur représentativité temporelle, géographique et technologique ;
- 2) Collectées de manière à ce qu'elles soient les moins agrégées possible ;
- 3) Documentées conformément aux meilleures pratiques disponibles.

Le Tableau 2-5 résume les principales sources de données et hypothèses employées dans cette ACV, alors que l'Annexe C présente le détail des données utilisées.

**Tableau 2-5 : Principales données, sources et hypothèses utilisées dans l'établissement de l'inventaire d'avant-plan – systèmes thermiques**

Système	Hypothèse	Source
<b>Systèmes géothermiques</b>		
Les deux systèmes géothermiques ont été modélisés à partir d'un processus générique <i>ecoinvent</i> (« <i>Heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW/RER</i> ») désagrégué et adapté au contexte québécois en fonction des paramètres de performance et des données rendues disponibles par le fabricant québécois Boréale Géothermie inc. (Internet).		
1. Pompe à chaleur liquide-air monobloc	<p>Capacité nominale : 10 kilowatts (ou environ 3 tonnes).</p> <p>Modèle utilisé pour l'adaptation au contexte québécois : Boréale<sup>MD</sup> AC-45 de Boréale Géothermie inc.</p> <p>COP moyen : 3,5 (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Durée de vie globale du système : 50 ans. Voir Tableau 2-1 pour la durée de vie des composantes.</p> <p>Rendement annuel : 72 000 MJ (ou 20 000 kWh) par an (pour 2 000 h de service annuellement).</p> <p>Cas de base : le système utilisé en mode de chauffage uniquement.</p> <p>Fluide caloporteur (boucle souterraine) : 30 % méthanol (antigel (102 kg); 70 % eau déminéralisée.</p> <p>Gaz frigorigène (boucle secondaire) : contient 3,0 kg de HFC-410a. 9 kg ajoutés au cours des 50 ans de vie du système pour compenser les fuites.</p> <p>Filtres à air (système de ventilation à air pulsé) : 3 unités (126 g/unité) remplacées tous les 2 ans.</p>	<p>Géothermie Boréale (2011)</p> <p>Heck, T. (2007)</p> <p>Marcotte, D. (2009)</p> <p>Rotondo, A. (2009)</p> <p>Lambert, P. (2013)</p> <p>Veilleux (2013)</p> <p>Massé (2013)</p>
2. Pompe à chaleur liquide-eau (hydronique)	<p>Capacité nominale : 10 kilowatts (ou environ 3 tonnes).</p> <p>Modèle utilisé pour l'adaptation au contexte québécois : Modèle Boréale<sup>MD</sup> HW-45 de Boréale Géothermie inc.</p> <p>COP moyen : 3,9.</p> <p>Le reste est identique à la pompe à chaleur liquide-air.</p>	<p>Géothermie Boréale (2009)</p> <p>Heck, T. (2007)</p> <p>Marcotte, D. (2009)</p> <p>Rotondo, A. (2009)</p> <p>Lambert, P. (2013)</p> <p>Veilleux (2013)</p> <p>Massé (2013)</p>

### Systèmes thermiques à circulation de fluide

Les deux systèmes solaires thermiques à circulation de fluide ont été modélisés à partir de processus génériques *ecoinvent* désagrégés et adaptés au contexte québécois :

- Pour le système solaire thermique à collecteurs plats, la donnée « *Heat, at flat plate collector, one-family house, for hot water/CH* » a été utilisée ;
- Pour le système solaire thermique à tubes sous vide, la donnée « *Heat, at tube collector, one-family house, for combined system/CH* » a été utilisée.

3. À collecteurs plats	<p>Modèle utilisé pour les simulations de rendements (ecoinvent) : similaire au Cobra X de fabrication suisse (Soltop Schuppisser AG).</p> <p>Durée de vie globale du système : 25 ans (<i>testé en analyse de sensibilité</i>). Voir Tableau 2-1 pour la durée de vie des composantes.</p> <p>Surface de captage : 6 m<sup>2</sup> (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Production totale (sur la durée de vie entière) : 194 166 MJ (ou 53 935 kWh) (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Liquide caloporteur : 40 % propylène glycol (antigel); 60 % eau déminéralisée.</p>	<p>Djebbar, R. (2009)</p> <p>Jungbluth, N. (2007)</p> <p>Solartechnik (2002)</p> <p>Canmet ÉNERGIE(2010)</p>
4. À tubes sous vide	<p>Modèle utilisé pour les simulations de rendements : similaire au Mazdon 30 de fabrication allemande (Termomax Kigspan Renewables Ltd.).</p> <p>Durée de vie globale du système : 25 ans. Voir Tableau 2-1 pour la durée de vie des composantes.</p> <p>Surface de captage : 10,5 m<sup>2</sup> (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Production totale (sur la durée de vie entière) : 468 597 MJ (ou 130 165 kWh).</p> <p>Liquide caloporteur : 40 % propylène glycol (antigel); 60 % eau déminéralisée.</p>	<p>Djebbar, R. (2009)</p> <p>Jungbluth, N. (2007)</p> <p>Solartechnik (2002)</p> <p>Canmet ÉNERGIE (2010)</p>

### Systèmes thermiques à collecteurs à air

Le système solaire thermique chauffe-air a été modélisé à partir des données primaires rendues disponibles par MC<sup>2</sup> Énergie, concepteur et fabricant québécois de panneaux solaires à air.

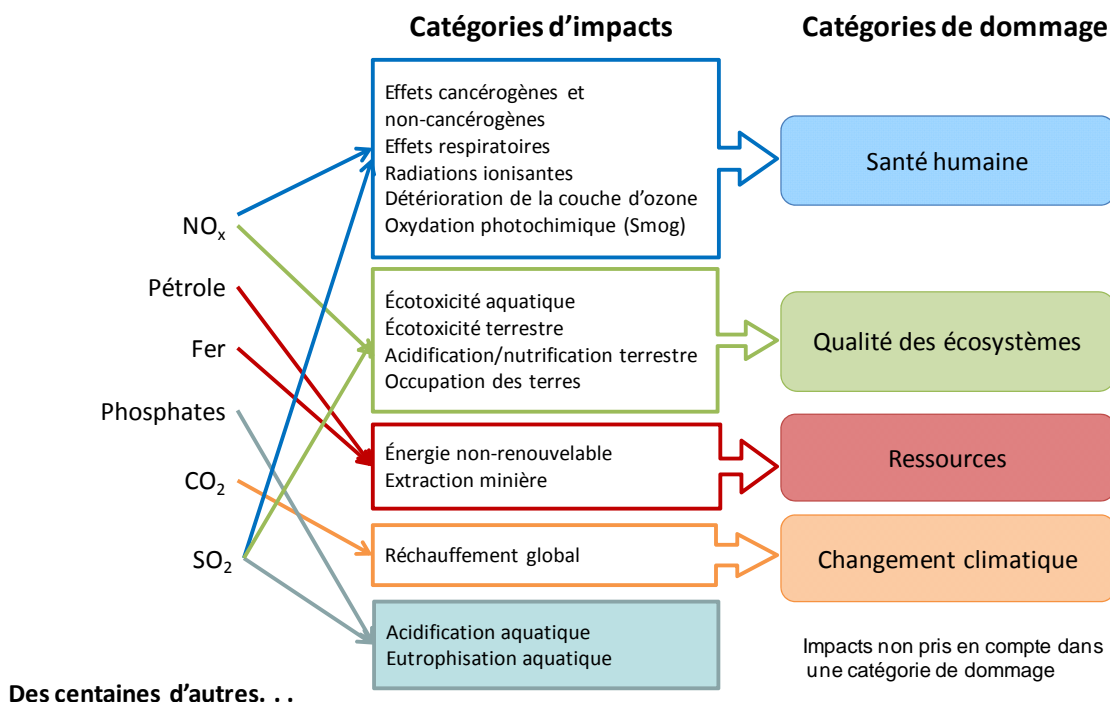
5. À collecteurs à air vitrés	<p>Modèle de capteur utilisé : ESOLAIR 2.0 (x2).</p> <p>Deux capteurs installés (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Surface de captage : 5,2 m<sup>2</sup>.</p> <p>Nombre de collecteurs : 2 (<i>testé en analyse de sensibilité</i>).</p> <p>Durée de vie globale du système : (<i>testé en analyse de sensibilité</i>). Voir Tableau 2-1 pour la durée de vie des composantes.</p> <p>Production totale (2 capteurs, sur la durée de vie entière) : 405 000 MJ (ou 112 500 kWh).</p>	<p>Questionnaire rempli par MC<sup>2</sup> Énergie (Éric Favreau)</p> <p>MC<sup>2</sup> Énergie (Internet)</p> <p>Favreau, E. (2010)</p>
-------------------------------	---	--

Le logiciel SimaPro 7.2, développé par PRé Consultants ([www.pre.nl](http://www.pre.nl)), a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et réaliser le calcul de l'inventaire.

## 2.7 Évaluation des impacts environnementaux

La méthode européenne IMPACT 2002+ (Joliet *et al.*, 2003) version 2.05, reconnue internationalement, a été choisie pour effectuer l'évaluation des impacts du cycle de vie des scénarios comparés. En plus de fournir les résultats pour quinze catégories d'impact, IMPACT 2002+<sup>5</sup> permet une agrégation en quatre catégories de dommage (Figure 2-12).

Cette méthode, bien que développée pour le contexte européen, a été préférée aux méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie nord-américaines existantes (LUCAS, TRACI) dû au large éventail couvert par les catégories de problème incluses, à la mise à jour fréquente des facteurs de caractérisation et à l'agrégation des catégories de problème en quatre catégories de dommage, ce qui simplifie la compréhension des résultats par des non-initiés à l'ACV.



**Figure 2-12 : Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+ (v.2.05).**

L'agrégation des impacts environnementaux selon ces quatre catégories de dommage fournit des résultats plus simples à comprendre et à interpréter pour les non-initiés à l'ACV, en plus de permettre une évaluation rapide des principaux enjeux environnementaux potentiels associés aux scénarios à l'étude.

Les catégories de dommage peuvent se résumer ainsi :

- **Santé humaine :** cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et respiratoires, produisant des radiations ionisantes et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le

<sup>5</sup> La présentation des catégories d'impact de la méthode IMPACT2002+ est habituellement disponible sur le site Internet [www.sph.umich.edu/riskcenter/joliet/impact2002+.htm#form2](http://www.sph.umich.edu/riskcenter/joliet/impact2002+.htm#form2). Un résumé tiré du site – en anglais uniquement – est fourni à l'Annexe B.

facteur de dommage, la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY - *Disabled Adjusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine.

- **Qualité des écosystèmes** : cette catégorie regroupe les impacts liés à la toxicité aquatique et terrestre, à l'acidification et la nitrification terrestre et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'espèces potentiellement disparues, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, par kilogramme de substance émise ( $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{an} / \text{kg}$ ).
- **Changement climatique** : le potentiel de chaque gaz à effet de serre (GES) est calculé en kilogrammes de dioxyde de carbone équivalents ( $\text{kg CO}_2 \text{ éq.}$ ), basé sur les données sur le forçage radiatif infrarouge. La méthode IMPACT 2002+ évalue les effets potentiels des émissions sur une période de 500 ans.
- **Ressources** : cette catégorie prend en compte l'utilisation de ressources énergétiques non renouvelables et l'extraction de minéraux, quantifiés en mégajoules d'énergie (MJ).

Mentionnons que :

- Ces catégories ne couvrent pas tous les impacts environnementaux possibles associés aux activités humaines. Plusieurs types d'impacts, dont le bruit, les odeurs, la qualité de l'air intérieur et les champs électromagnétiques ne font pas partie de la présente analyse. De plus, l'utilisation de l'eau n'est pas considérée dans cette version de la méthode.
- L'eutrophisation et l'acidification aquatiques ne sont pas prises en compte par les indicateurs de dommage de la méthode IMPACT 2002+ v.2.05 (dommages relatifs à la qualité des écosystèmes). Ces catégories d'impact sont donc évaluées en conjonction avec les indicateurs de dommage pour compléter l'évaluation des impacts du cycle de vie.
- Aucune normalisation des résultats par rapport à une base de référence n'a été effectuée. De même, aucune pondération des catégories de dommage pour ramener les résultats à un score unique n'a été réalisée (voir annexe A pour plus de détail sur les notions de pondération et de normalisation).
- Les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels. Il s'agit d'expressions relatives (à l'unité fonctionnelle notamment) qui ne permettent pas de prédire les impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

Tout comme pour l'inventaire, le logiciel SimaPro 7.3 a été utilisé pour faire le calcul des impacts potentiels associés aux émissions inventoriées. C'est lui qui procède à la classification des flux élémentaires entre les diverses catégories d'impact et au calcul des résultats d'indicateur de dommage.

Une deuxième évaluation basée sur la méthode ReCiPe (Goedkoop *et coll.*, 2009) a été réalisée en analyse de sensibilité afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

## 2.8 Interprétation

Cette dernière phase de l'ACV permet de discuter les résultats obtenus suite à l'évaluation des impacts du cycle de vie et de les mettre en perspective. Elle inclut une comparaison des systèmes, tels que décrits à la section 2.2.

Les résultats présentés au chapitre 3 sont appuyés sur une analyse complète et approfondie des données d'inventaire et de l'évaluation des impacts du cycle de vie. Cela comprend notamment :

- Une évaluation de la qualité des données ;
- Une analyse de cohérence et de complétude ;
- Des analyses de sensibilité ;
- Des analyses d'incertitudes.

La méthodologie employée pour l'analyse et l'interprétation des données telles que l'évaluation de la qualité des données, la cohérence et la complétude et les analyses de sensibilité sont résumées ici. Mais d'abord, une précision est donnée quant à l'analyse de l'inventaire.

### 2.8.1 Analyse de l'inventaire

Les résultats d'inventaire en termes de quantités de matières et d'énergie associées à chacun des systèmes à l'étude ne sont pas présentés dans le corps de ce rapport. L'analyse exhaustive des entrants et sortants n'améliore généralement pas la compréhension des enjeux. En effet, les résultats d'inventaire (qui sont disponibles à l'Annexe E) contiennent trop d'informations et ne permettent pas en soi de conclure. Pour que l'analyse de l'inventaire soit pertinente, elle doit être faite en parallèle avec l'évaluation des impacts. Ainsi, en accord avec la norme ISO 14 044, l'évaluation des impacts du cycle de vie présentée et discutée au chapitre 3 constitue l'interprétation des résultats d'inventaire, en ayant pour but de mieux en comprendre la portée environnementale. Une analyse de contribution permet également d'identifier les flux d'inventaire qui sont à la source des impacts prédominants.

### 2.8.2 Évaluation de la qualité des données d'inventaire

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'ACV dépend de la qualité des données d'inventaire qui sont utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent certaines exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude.

Selon la norme ISO, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la **validité**, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devraient être représentatives :

- De la période définie par l'unité fonctionnelle, soit 2011 (voir section 2.3) ;
- Du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude, soit le Québec (voir sous-section 2.5.2) ;
- Des caractéristiques technologiques des processus de fabrication, d'exploitation et de démantèlement (en fin de vie) des systèmes.

Bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO, deux critères ayant une influence sur la qualité de l'inventaire ont été choisis pour évaluer les données :

- **Fiabilité** : concerne les sources, les méthodes d'acquisition et les procédures de vérification des données. Une donnée jugée fiable est une donnée vérifiée et mesurée sur le terrain. Ce critère se réfère principalement à la quantification des flux.
- **Représentativité** : traite des corrélations géographique et technologique. Est-ce que l'ensemble des données reflète la réalité? Une donnée est jugée représentative lorsque la technologie est en relation directe avec le champ d'études. Ce critère se rapporte principalement au choix des processus servant à modéliser le système.

Une description plus détaillée des critères et l'évaluation de la qualité des données sont présentées à l'Annexe D.

En parallèle à l'évaluation de la qualité des données utilisées, une estimation de la contribution des processus (c.-à-d. dans quelle mesure les processus modélisés avec ces données contribuent à l'impact global du système à l'étude) a été effectuée. En effet, une donnée de qualité inférieure peut très bien convenir dans le cas d'un processus dont la contribution est minime. Par contre, des données de bonne qualité devront être recherchées pour les processus qui influencent grandement les conclusions de l'étude.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de contribution a consisté à observer l'importance relative des différents processus modélisés à l'impact potentiel global évalué pour chacune des quatre catégories de dommage mentionnées à la section 2.7, ainsi que pour les deux catégories d'impacts non caractérisées en dommage.

Les résultats de l'analyse de contribution sont disponibles à l'annexe E.

### **2.8.3 Analyse de cohérence et de complétude**

Tout au long de l'étude, une attention a été portée afin que les systèmes soient représentés de manière conforme à la définition des objectifs et du champ de l'étude. De plus, lors de la collecte de données et de la modélisation, la définition des frontières, les hypothèses et les méthodes ont été appliquées de manière similaire à tous les systèmes.

Il y a donc **cohérence** entre les systèmes étudiés au regard des sources de données, de leur précision, de leur représentativité technologique, temporelle et géographique.

La **complétude** a été assurée grâce à une définition attentive des frontières des systèmes analysés et par une utilisation systématique des règles d'extension et d'imputation. Des analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'effet des hypothèses et des approximations employées.

### **2.8.4 Analyses de sensibilité**

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, plus particulièrement liée aux hypothèses et modules de données génériques employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées.

À partir des principaux processus/paramètres contributeurs et d'une évaluation de qualité des données, des analyses de sensibilité ont été effectuées sur les paramètres suivants :

- **Contexte énergétique au lieu d'installation** : Dans l'analyse initiale, il est considéré que les systèmes de production d'énergie décentralisée étaient installés au Québec et de ce fait, consommaient l'électricité du mélange d'approvisionnement énergétique

québécois durant leur étape d'utilisation. Or, l'importante part de l'énergie québécoise produite à partir de centrales hydroélectriques confère à la province un avantage sur le plan environnemental (par rapport à l'Ontario et aux États-Unis notamment, dont la production énergétique est en grande partie dépendante des énergies fossiles que sont le charbon, le gaz naturel et le mazout léger). Afin de tester l'effet du contexte énergétique du lieu d'installation des systèmes, le mélange d'approvisionnement énergétique nord-américain (plus concentré en énergies fossiles) a été employé pour représenter l'énergie consommée lors de l'utilisation des systèmes.

- **Rendement des systèmes géothermiques :** Dans l'analyse initiale, un système géothermique liquide-eau moyen ayant un coefficient de performance (COP) de 3,9 a été modélisé. Par contre, la valeur du COP pour un système géothermique donné peut varier au cours d'une année, notamment en fonction de l'écart de température entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. La sensibilité des résultats à la valeur du COP des systèmes a donc été examinée. L'analyse a été effectuée pour le **système géothermique liquide-eau**, avec des COP variant entre 1,5 et 5,5 (maximum actuellement possible). Le système liquide-air suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.
- **Rendement des capteurs solaires thermiques à circulation de fluide (énergie produite par unité de surface installée) :** Dans l'analyse initiale, un système thermosolaire à collecteurs plats ayant un rendement de 539 kWh/m<sup>2</sup>.an a été utilisé pour le chauffage de l'eau sanitaire (ce qui correspond à un rendement assez modeste de 39 à 50 % selon l'intervalle d'ensoleillement au Québec). Or, les caractéristiques de performance d'un système peuvent varier considérablement en fonction du modèle de capteur solaire et du niveau d'ensoleillement au lieu d'exploitation du système. La sensibilité des résultats à une variation du rendement des capteurs a donc été effectuée pour le **système à collecteurs plats**, pour des valeurs allant de 539 à 700 kWh/m<sup>2</sup> (*soit un rendement de 50 à 65 % selon les conditions d'ensoleillement*). Le système à tubes sous vide suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.
- **Surface de collecteurs installée pour les systèmes solaires thermiques à circulation de fluide :** La configuration initiale du système à collecteurs plats consiste en une surface de captage de 6 m<sup>2</sup>, alors que celle du système à collecteurs à tubes sous vide compte 10,5 m<sup>2</sup>. L'effet de configurations alternatives pour une surface de captage variant respectivement entre 4 et 10 m<sup>2</sup> et entre 10 et 20 m<sup>2</sup> ont donc été testées.
- **Durée de vie des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide :** Dans l'analyse initiale, une durée de vie de 25 ans a été utilisée pour la modélisation des systèmes thermosolaires à collecteurs plats et à tubes sous vide. Comme pour le rendement, une incertitude difficilement réductible prévaut quant à la durée de vie de certaines des composantes de ces systèmes. En particulier, la durée de vie des capteurs semble ne pas faire consensus parmi les différents acteurs du secteur. La sensibilité des résultats à une série de variations plausibles de la durée de vie des capteurs a donc été examinée. L'analyse a été effectuée pour le **système à collecteurs plats**, avec des durées de vie variant entre 25 et 45 ans. Le système à tubes sous vide suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.



- **Durée de vie du système solaire thermique à collecteur à air :** Dans l'analyse initiale, une durée de vie de 37,5 ans a été utilisée pour la modélisation du système. Une incertitude difficilement réductible prévaut toutefois quant à la durée de vie, la seule référence ayant été le fabricant du système. Aucun consensus n'est ressorti quant à la durée de vie de ce type de capteur entre les experts consultés. La sensibilité des résultats à la durée de vie des capteurs a donc été examinée sur une plage variant entre 20 et 40 ans.
- **Capacité du système solaire à collecteurs à air (nombre de collecteurs installés) :** Bien que la documentation du concepteur et fabricant des capteurs ESOLAIR 2.0 soit claire à l'effet qu'un ou deux capteurs constituent la plupart des systèmes de ce type actuellement en service au Québec, il demeure envisageable qu'une résidence soit dotée d'une capacité de production supérieure par l'ajout de capteurs chauffe-air. L'effet d'une configuration alternative comprenant l'installation simulée d'un nombre de capteurs variant entre 2 et 16 a donc été testé. Malgré le fait que l'installation d'une grande surface de captage présente des enjeux sur les plans technique et économique, il a semblé intéressant de faire ressortir le seuil au-delà duquel les tendances sont modifiées.

Les résultats des analyses de sensibilité effectuées sont présentés à la section 3.5.

Une analyse spécifique a également été réalisée dans le cadre de la comparaison des systèmes sur la base de la demande en énergie d'une résidence moyenne :

- **Considération de la fonction climatisation :** De toutes les options évaluées, seul le système géothermique liquide-air permet de climatiser l'air d'une résidence et ce, sans qu'aucune modification ne soit apportée à sa configuration. Aussi, il est rare qu'un tel système ne soit pas employé en été. Pour offrir le même service (c.-à-d. pour inclure la fonction climatisation), les autres systèmes doivent être jumelés à des climatiseurs externes. Des climatiseurs individuels de type mural ont donc été modélisés, avec leur consommation énergétique annuelle afin de comparer les systèmes dans une perspective plus globale. Les détails et les résultats de l'analyse sur la fonction climatisation sont présentés à la sous-section 3.3.3

Il est à noter qu'aucune analyse de sensibilité n'a été effectuée dans le but d'affiner les frontières des systèmes. En effet, tous les processus modélisés ont été pris en considération dans l'analyse.

#### **2.8.5 Analyse d'incertitude**

L'incertitude inhérente au modèle ACV est de deux ordres :

- L'incertitude sur les données d'inventaire, évaluée à l'aide d'une analyse de type Monte-Carlo ;
- L'incertitude sur les modèles de caractérisation, qui traduisent l'inventaire en indicateurs environnementaux.

### **Incertitude sur les données d'inventaire : analyse Monte-Carlo**

Une analyse d'incertitude de type Monte-Carlo a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 7.3 afin de tester la robustesse des résultats. Elle constitue une étude de propagation de la variabilité des données d'inventaire lors des calculs, avec un nombre d'itérations fixé à 1 000.

Sur les milliers de flux élémentaires individuels inventoriés dans les processus élémentaires des scénarios étudiés, la très grande majorité provient de la banque de données *ecoinvent*. Ceux-ci présentent pour la plupart une variabilité qui prend la forme d'une distribution *lognormale* autour de la valeur centrale spécifiée (et utilisée dans les calculs déterministes), caractérisée par son écart-type. Ces variabilités ne sont toutefois pas déterminées statistiquement à l'aide de mesures concrètes, mais estimées par l'application d'une *matrice pedigree* décrivant la qualité d'une donnée selon son origine, son mode de collecte et sa représentativité géographique, temporelle et technologique (Weidema et Suhr Wesnæs, 1996).

Au total, 70 % des données ont une distribution statistique associée.

La simulation Monte-Carlo procède à la soustraction de deux systèmes que l'on souhaite comparer. Ainsi, les résultats indiquent la probabilité qu'une option ait des indicateurs plus élevés que l'autre.

Pour la présente étude, chacun des systèmes de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle a été comparé au réseau d'Hydro-Québec, sur la base de la production de 1 kWh.

Les résultats de l'analyse d'incertitude ont été considérés lors de l'analyse des résultats des systèmes évalués. Les détails des analyses Monte-Carlo effectuées sont disponibles à l'Annexe E.

### **Incertitude sur les modèles de caractérisation**

L'incertitude sur les modèles de caractérisation, qui traduisent l'inventaire en indicateurs environnementaux, a été estimée à partir des lignes directrices proposées par les auteurs de la méthode IMPACT 2002+ (Humbert et coll., 2009). Ceux-ci établissent des seuils de significativité pour différentes catégories d'impact, en deçà desquels il n'est pas possible de conclure quant à la meilleure performance environnementale d'une option sur une autre :

- 10 % en termes de changement climatique, d'énergie non renouvelable et d'utilisation des ressources ;
- 30 % en termes d'effets respiratoires dus aux substances inorganiques (santé humaine), d'acidification et d'eutrophisation ;
- Un ou deux ordres de magnitude en termes d'effets toxicologiques et écotoxicologiques. Ce seuil est notamment employé pour l'indicateur de dommage *Qualité des écosystèmes*.

Ces lignes directrices dépendent toutefois de la corrélation entre les systèmes comparés; deux systèmes similaires présentant des écarts inférieurs à ceux exposés ci-dessus peuvent donc être considérés comme significativement différents. L'interprétation proposée au chapitre 3 prend donc en compte ces différents aspects.

## 2.9 Revue critique

Parce que les résultats de cette étude doivent être divulgués publiquement et sont destinés à supporter une affirmation comparative, une revue critique a été réalisée par un comité d'experts indépendants, c'est-à-dire composé d'un spécialiste ACV et de deux autres spécialistes des domaines impliqués dans l'étude (Tableau 2-6).

**Tableau 2-6 : Membres constituant du comité de revue critique**

Nom	Organisme d'attache	Implication / Champ d'expertise
Gontran Bage, ing. Ph.D.	À l'emploi de Dessau au moment d'initier la revue critique	Président du comité de revue, expert ACV
Reda Djebbar, ing., Ph.D.	CanmetÉnergie – Ressources naturelles Canada	Réviseur, énergie solaire thermique
Philippe Pasquier, ing., Ph.D.	Département CGM, Polytechnique Montréal	Réviseur, énergie géothermique

Conformément aux normes ISO 14 040 et 14 044 (2006a, b), les objectifs de la revue critique sont d'assurer que :

- Les méthodes utilisées par le CIRAIG pour réaliser l'analyse du cycle de vie sont :
  - cohérentes avec la norme internationale ISO 14040 ;
  - valables d'un point de vue technique et scientifique ;
  - appropriées et raisonnables par rapport à l'objectif de l'étude ;
- Les interprétations du CIRAIG reflètent les limitations identifiées et l'objectif de l'étude ;
- Le rapport détaillé est transparent et cohérent.

Le processus de revue critique a été réalisé en quatre temps :

1. Révision du rapport final de l'étude par le comité ;
2. Correction et précision des éléments soulevés par les réviseurs ;
3. Retour du rapport modifié aux réviseurs pour validation de la conformité ISO 14 044 ;
4. Dépôt du rapport final révisé au mandataire.

Les commentaires des réviseurs, les réponses aux éléments soulevés et le rapport de revue font l'objet de l'Annexe F.

### 3 Résultats et discussion

---

Ce chapitre couvre les deux dernières phases de l'ACV : c'est-à-dire l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) des systèmes évalués et l'interprétation des résultats, conformément au cadre méthodologique présenté aux sections 2.7 et 2.8. Il présente le profil environnemental des six systèmes à l'étude, leur comparaison, de même que différentes études de sensibilités et une analyse de la qualité des données. Les résultats comprennent toujours les quatre catégories de dommages (*Santé humaine* (SH), *Qualité des écosystèmes* (QÉ), *Changement climatique* (CC), *Ressources* (R)) et les deux catégories d'impacts (*Acidification aquatique* (AA) et *Eutrophisation aquatique* (EA)) de la méthode d'évaluation IMPACT 2002+.

#### 3.1 Profil environnemental des systèmes

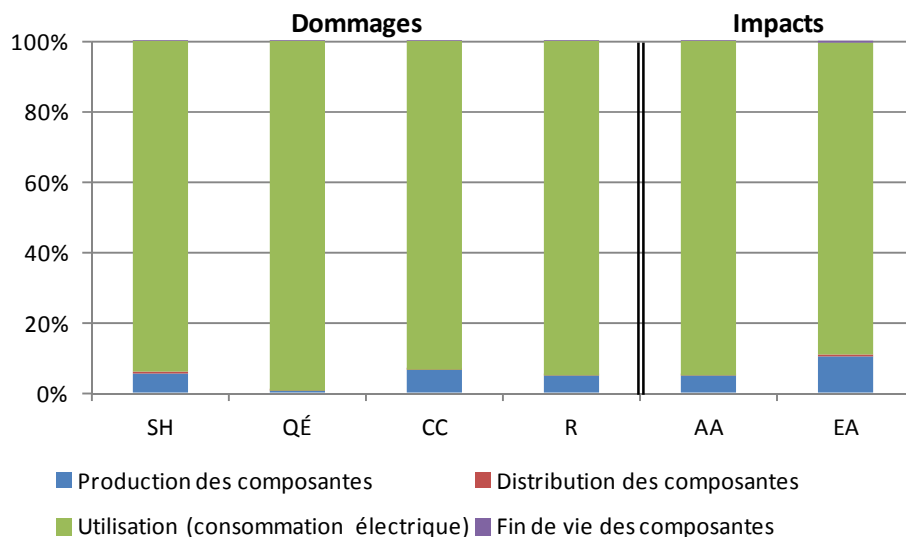
Le premier objectif de l'étude était d'établir le profil environnemental de systèmes génériques de production décentralisée d'énergie thermique. Tous les processus modélisables ont donc été inclus au modèle. Les résultats d'indicateurs d'IMPACT 2002+ cités plus haut ont servi à identifier les processus et paramètres qui contribuent le plus aux impacts potentiels des différents systèmes (c.-à-d. à identifier les points chauds du cycle de vie de chacune des technologies).

Mais avant tout, le profil environnemental du système de référence est présenté afin que les analyses comparatives qui suivent puissent être interprétées de manière plus éclairée.

##### 3.1.1 Système de référence (chauffage électrique) et kWh distribué par Hydro-Québec

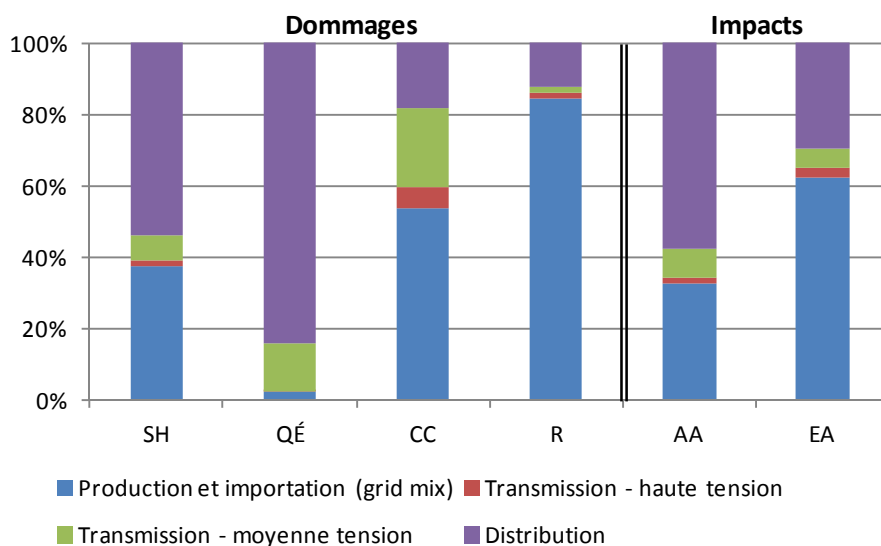
La Figure 3-1 présente les contributions relatives de chacune des étapes du cycle de vie du système de référence, soit le chauffage des espaces et de l'eau sanitaire d'une résidence par des plinthes et un chauffe-eau électriques alimentés par l'électricité distribuée par le réseau d'Hydro-Québec. Ce profil, établi sur la base d'un mégajoule de chauffage fourni à une résidence, considère que 75 % de l'énergie thermique consommée sert à chauffer l'air et 25 % sert à chauffer l'eau.

Il ressort clairement de cette analyse que la consommation d'électricité liée à l'étape d'utilisation des équipements de chauffage est prédominante, représentant de 88 à 99 % des impacts environnementaux potentiels selon les indicateurs évalués. La production des équipements (plinthes et chauffe-eau) compte pour 1 à 10 % des impacts potentiels selon les catégories considérées, alors que leur distribution et leur fin de vie ont des contributions négligeables (moins de 1 %).



**Figure 3-1 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système de référence –chauffage électrique, par MJ produit (IMPACT 2002+).**

Pour mieux comprendre la provenance des impacts potentiels liés à l'étape d'utilisation, une analyse du kWh distribué par Hydro-Québec a donc été réalisée (Figure 3-2). Cette analyse s'applique par ailleurs à la consommation d'électricité par tous les systèmes décentralisés évalués.



**Figure 3-2 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du kWh distribué par Hydro-Québec (IMPACT 2002+).**

Il en ressort que la transmission d'électricité à haute tension contribue faiblement aux scores des indicateurs environnementaux, alors que les étapes de production et de distribution d'électricité se partagent la grande majorité des impacts environnementaux potentiels.

L'indicateur *Santé humaine* est affecté à 37 % par l'étape de production électrique, et plus particulièrement par les émissions des centrales électriques au charbon (particules, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)

opérées par les territoires voisins d'où Hydro-Québec importe de l'énergie. L'étape de distribution contribue également à 54 % de l'indicateur, à cause de la production de cuivre pour les câbles et de l'arsenic employé dans le traitement des poteaux.

La *Qualité des écosystèmes* est influencée à 84 % par l'étape de distribution, à cause de la lixiviation des produits de préservation des poteaux de bois (chrome et cuivre) et de la production des câbles de distribution. Les métaux émis (Cr, Cu) par le réseau de transmission moyenne tension influencent également cet indicateur, mais dans une moindre mesure (13 %). Il faut noter que les modèles d'évaluation employés pour caractériser les émissions toxiques ont tendance à surestimer les impacts potentiels des métaux émis au sol. Les incertitudes quant aux résultats de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* sont donc importantes.

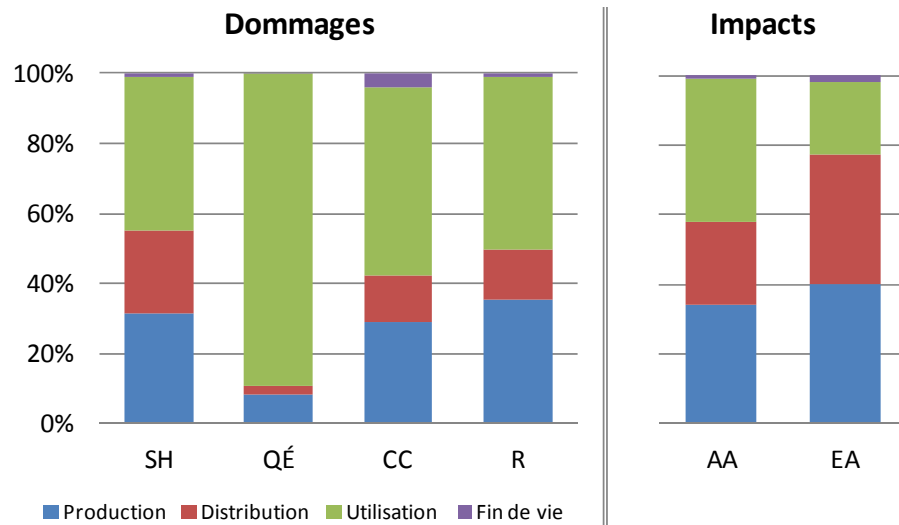
Pour l'indicateur *Changement climatique*, 54 % des impacts potentiels sont associés à la production d'électricité à partir de sources fossiles (charbon, gaz naturel) qui ont lieu à l'extérieur du Québec, alors que la transmission moyenne tension et la distribution comptent pour 22 et 18 % respectivement, à cause des émissions d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et de la production des métaux employés pour la construction des réseaux.

Les indicateurs *Ressources*, *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique* sont influencés respectivement à 84, 32 et 63 % par l'étape de production d'électricité, dominée par les centrales opérées à l'extérieur du Québec. L'extraction d'uranium, de charbon et de gaz naturel et les émissions de combustion du charbon sont les principaux éléments qui influencent la contribution de l'étape de production. L'étape de distribution affecte également l'indicateur *Acidification aquatique* (58 %), à cause de la production de cuivre pour les câbles.

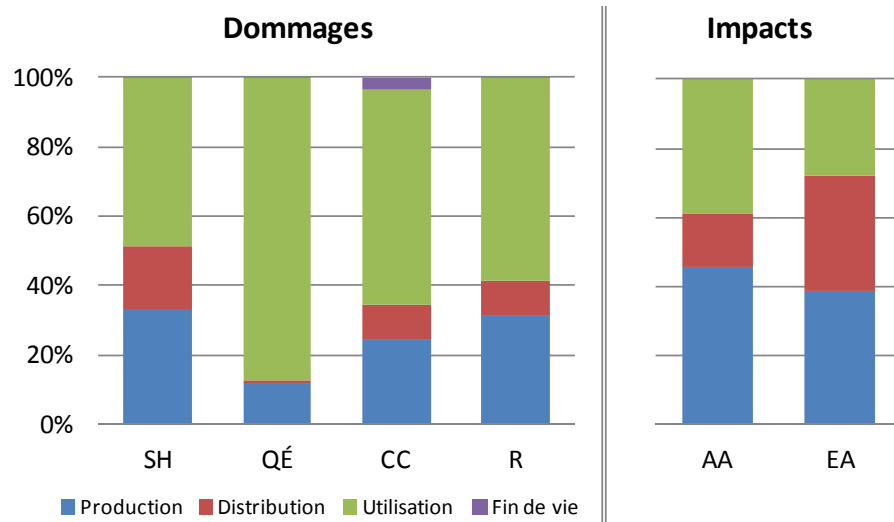
### **3.1.2 Systèmes géothermiques**

Cette sous-section regroupe les résultats d'analyse des deux systèmes géothermiques, soit le système liquide-eau et le système liquide-air. En raison de leurs profils environnementaux très semblables, il est en effet possible d'étendre l'interprétation des résultats d'un système à l'autre.

La Figure 3-3 et la Figure 3-4 présentent les contributions relatives de chacune des étapes du cycle de vie à l'impact global engendré par les systèmes géothermiques liquide-eau et liquide-air.



**Figure 3-3 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système géothermique liquide-eau, par MJ produit (IMPACT 2002+).**



**Figure 3-4 : Contributions environnementales relatives des étapes du cycle de vie du système géothermique liquide-air, par MJ produit (IMPACT 2002+).**

L'analyse des systèmes fait ressortir que :

- Les étapes de production et d'utilisation contribuent ensemble de manière importante à tous les indicateurs évalués ;
- L'étape de distribution engendre également une part significative des impacts potentiels dans toutes les catégories à l'exception de *Qualité des écosystèmes* ;
- L'étape de fin de vie des systèmes contribue de manière négligeable aux scores des indicateurs environnementaux évalués.

### Étape de production

Dans cinq catégories d'indicateurs sur six (à l'exception de *Qualité des écosystèmes*), l'étape de production des composantes accapare entre 25 % et 46 % des impacts potentiels. La production de la boucle souterraine et des pompes à chaleur (pour les deux systèmes), celle du plancher radiant (pour le système liquide-eau) et celle du système de ventilation à air pulsé (pour le système liquide-air) se répartissent la quasi-totalité des impacts de cette étape.

### Étape de distribution

Pour tous les systèmes, l'étape de distribution inclut le transport, l'installation et le raccordement des composantes à la résidence. Pour les systèmes géothermiques, cela implique la réalisation d'un forage - incluant l'opération de la machinerie, le transport et la gestion des résidus - pour la mise en place de la boucle souterraine. Dans toutes les catégories à l'exception de *Qualité des écosystèmes*, l'étape de distribution contribue à entre 10 % et 37 % des impacts : plus des deux tiers sont attribuables à la combustion du diesel nécessaire aux opérations de forage de la boucle souterraine (correspondant à 414 kg de diesel brûlé). L'installation du système de ventilation à air pulsé (pour le système liquide-air) a un impact relatif négligeable, alors que l'installation du plancher radiant (pour le système liquide-eau) contribue entre 22 à 34 % des impacts de l'étape.

### Étape d'utilisation

L'importance de l'étape d'utilisation sur les indicateurs *Santé humaine* (44 et 49%), *Ressources* (49 et 59%), *Acidification aquatique* (39 et 41%), *Eutrophisation aquatique* (28 et 21%) et *Qualité des écosystèmes* (88 et 89%) est en majeure partie attribuable aux impacts découlant de la production et de la distribution de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur et issue du réseau d'Hydro-Québec. Se référer à la Figure 3-2 pour le détail des contributeurs environnementaux potentiels liés à la consommation électrique.

Finalement, la contribution de l'étape d'utilisation à l'indicateur *Changement climatique* (54 et 62 % du score total) est en partie attribuable à la consommation électrique des systèmes (pour 32 et 38 %), mais également aux émissions fugitives de frigorigène à l'air (21 et 23 %). Le taux de fuite du gaz frigorigène considéré, issu de la donnée générique ecoinvent (Heck, 2007), est équivalent à 9 kg sur 50 ans d'opération (soit une fuite de 6 % par année).

### Étape de fin de vie

L'étape de fin de vie des systèmes ne contribue que très marginalement à l'impact total des systèmes géothermiques, contribuant tout au plus à 4 % de l'indicateur *Changement climatique*. Les émissions de gaz réfrigérants en fin de vie sont en cause : bien que les quantités émises à l'air soient minimes, le potentiel de réchauffement climatique du HFC-134a est, sur un horizon de 500 ans (tel que considéré dans la méthode IMPACT 2002+), équivalent à 435 fois celui du dioxyde de carbone (IPCC, 2007).

### Analyse des paramètres clés

A priori, l'efficacité de la pompe à chaleur (ou le COP) et la qualité du dimensionnement<sup>6</sup> du système géothermique ressortent comme des paramètres clés. Or, au Québec, une majorité de

---

<sup>6</sup> C'est-à-dire la justesse et la précision de l'hypothèse de calcul qui traduisent la relation entre le potentiel géothermique du sol, les spécifications techniques de la boucle souterraine et de la thermopompe, et le besoin en énergie thermique de la résidence.



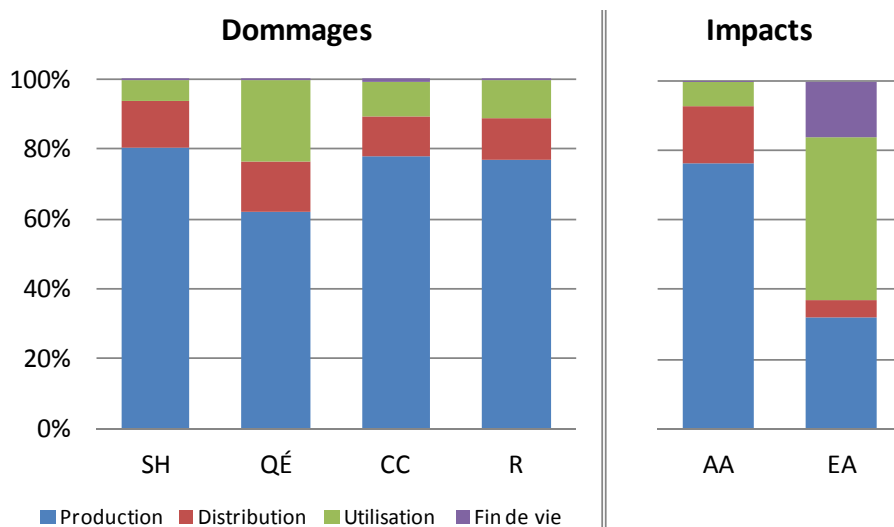
concepteurs/installateurs résidentiels tendraient à surdimensionner la thermopompe, ce qui engendrerait une boucle souterraine trop longue, une surcapacité dormante et des surcoûts pour l'acheteur (Rotondo, 2009). Cette tendance ne s'appliquerait cependant pas aux concepteurs/installateurs de systèmes commerciaux.

Parallèlement, l'impact ou le dommage associé à la production des composantes du système géothermique ressort comme significatif pour tous les indicateurs environnementaux évalués. Ce résultat est en partie attribuable à la fabrication des composantes ailleurs qu'au Québec (qui implique une utilisation plus importante d'énergie générée à partir de charbon et d'autres combustibles fossiles), à la production des métaux qui les composent, de même qu'au transport des matériaux. Une attention particulière devrait donc être portée à la masse des composantes, ainsi qu'au lieu de production, tant pour réduire les distances de transport que pour favoriser les composantes produites localement en utilisant l'électricité québécoise. L'identification de ces paramètres clés offre une piste d'amélioration intéressante à la lumière de la tendance actuelle au surdimensionnement (expliquée plus haut). Si un dimensionnement optimal et adéquat des systèmes géothermiques résidentiels devenait la norme, des gains pourraient se concrétiser en matière de : 1) performance énergétique et économique à la résidence, 2) consommation et émissions lors des transports et 3) réduction des quantités de matériaux, et donc d'énergie de production consommée en amont de l'étape d'exploitation, le long de la chaîne de production.

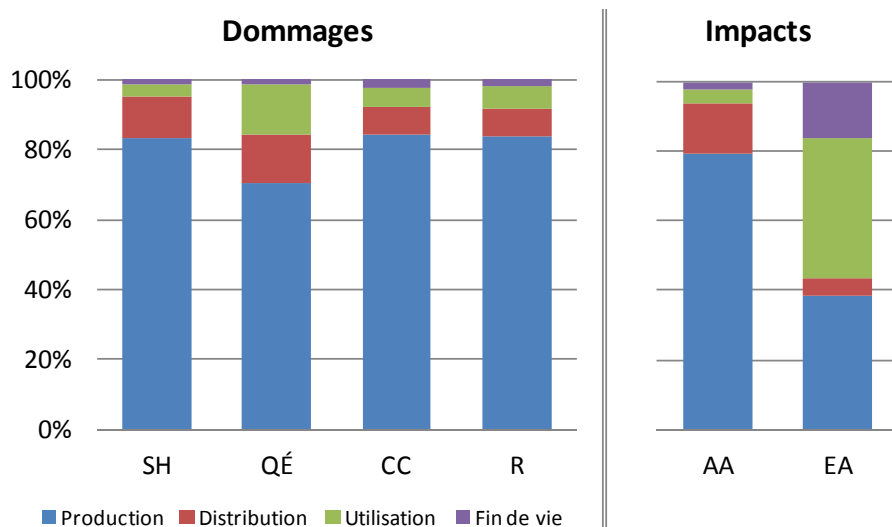
### 3.1.3 Systèmes solaires thermiques à collecteurs plats et à tubes sous vide

Cette sous-section regroupe les résultats d'analyse de deux des trois systèmes solaires thermiques, soit le système à collecteurs plats et le système à tubes sous vide. En raison de leurs profils environnementaux très semblables, il est en effet possible d'étendre l'interprétation des résultats d'un système à l'autre.

La Figure 3-5 et la Figure 3-6 présentent les contributions relatives de chacune des étapes du cycle de vie à l'impact global engendré par les systèmes à collecteurs plats et à tubes sous vide.



**Figure 3-5 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à collecteurs plats, par MJ produit (IMPACT 2002+).**



**Figure 3-6 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à tubes sous vide, par MJ produit (IMPACT 2002+).**

L'analyse des systèmes fait ressortir que :

- L'étape de production domine le profil de cinq des six indicateurs considérés (tous à l'exception de l'*Eutrophisation aquatique*) ;
- Ensemble, les étapes de distribution et d'utilisation engendrent une part significative des impacts potentiels dans toutes les catégories d'indicateurs ;
- L'étape de fin de vie a une contribution négligeable, sauf pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*.

La durée de vie relativement courte des composantes des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide (10 ou 25 ans selon les cas) par rapport à celles des systèmes géothermiques, de même que leur plus faible rendement énergétique, tend à faire ressortir la contribution de l'étape de production.

#### Étape de production

L'importance de l'étape de production sur les indicateurs *Santé humaine* (80 et 83%), *Qualité des écosystèmes* (62 et 63%), *Changement climatique* (67 et 78%), *Ressources* (77 et 84%) et *Acidification aquatique* (76 et 79%) est en majeure partie attribuable aux activités de fabrication du réservoir à eau chaude et des capteurs solaires. Ensemble, les étapes de production de ces deux composantes s'approprient plus du deux tiers des impacts dans toutes les catégories à l'exception du potentiel d'*Eutrophisation aquatique*. La production des métaux – acier, cuivre, aluminium – et l'énergie nécessaire à leur production, de même que leur transport sont ici en cause.

#### Étape de distribution

Pour tous les systèmes, l'étape de distribution inclut le transport, l'installation et le raccordement des composantes à la résidence. Pour les systèmes thermiques, cela n'implique pas de travaux important ou énergivore. La contribution de l'étape de distribution au score total (soit entre 5 et 17 % dans toutes les catégories d'indicateurs) est attribuable au transport des principales composantes vers le lieu d'installation. Dans une moindre mesure, la fabrication des

accessoires de raccordement (associés à l'arrière-plan du système) contribue également : en particulier, la fabrication de la tuyauterie de cuivre, du propylène glycol et de l'isolant à tuyaux.

### Étape d'utilisation

Comme c'était le cas pour les systèmes géothermiques, la portion des dommages associée à l'étape d'utilisation est en grande part attribuable à l'énergie d'exploitation, sauf pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*. Pour ce dernier, l'impact potentiel découle presque totalement du remplacement du fluide caloporteur : il est estimé que le propylène glycol injecté dans les conduites des systèmes solaires à circulation de fluide doit être remplacé tous les 10 ans, soit 2 fois au cours des 25 années d'utilisation du système. Dans la modélisation, il a été considéré que le fluide usagé était rejeté aux égouts et traité par une usine municipale de traitement des eaux usées. Ce résultat est très incertain et doit être considéré avec prudence, d'abord parce qu'il existe une incertitude quant à la gestion du fluide caloporteur, et ensuite parce que le processus générique employé pour modéliser le traitement est assez peu représentatif des installations québécoises. Dans ce dernier, ce sont les émissions directes de polluants à l'eau qui provoquent une augmentation de la demande chimique en oxygène (DCO), phénomène auquel est associé l'ensemble des impacts attribuables au traitement du fluide caloporteur remplacé. À partir de cette information, on note cependant qu'une attention à la gestion des fluides caloporteurs en fin de vie serait à considérer.

Pour les deux systèmes, l'étape d'utilisation ressort également dans la catégorie *Qualité des écosystèmes*, pour laquelle elle contribue à 23 % (collecteurs plats) et 17 % (à tubes sous vide) des impacts totaux. Comme c'était le cas pour les systèmes géothermiques, cette contribution est en majeure partie attribuable aux impacts découlant de la production et de la distribution de l'électricité nécessaire au fonctionnement du système et issue du réseau d'Hydro-Québec. Se référer à la Figure 3-2 pour le détail des contributeurs environnementaux potentiels liés à la consommation électrique.

### Étape de fin de vie

L'étape de fin de vie des systèmes ne contribue que très marginalement à l'impact total des systèmes solaires thermiques, exception faite de l'indicateur *Eutrophisation aquatique*, pour lesquels elle contribue à 16 % du score total. Cet impact découle en grande partie des effets du traitement du fluide caloporteur en fin de vie (voir paragraphe précédent).

### Analyse des paramètres clés

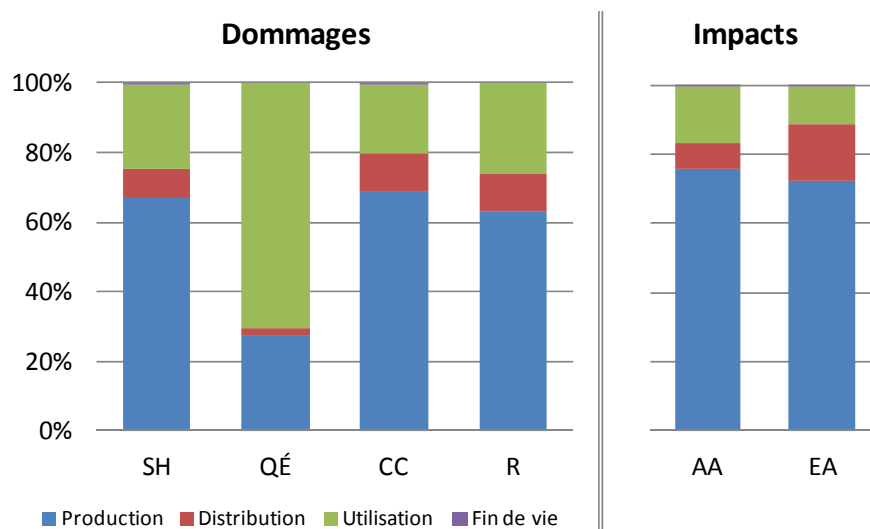
L'impact ou le dommage associé aux opérations de production des composantes des systèmes solaires thermiques ressort comme dominant dans cinq catégories sur six, soit en *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changements climatiques*, *Ressources* et *Acidification aquatique*. Tel que mentionné, ce résultat est en grande partie attribuable à la fabrication des composantes, notamment à la production des métaux qui les constituent. Une attention particulière devrait donc être portée à la masse des composantes de même qu'à leur durée de vie. Dans la perspective d'éventuelles réductions des quantités de matières utilisées pour la fabrication des composantes les plus contributrices (soit le réservoir et les capteurs), des gains pourraient se concrétiser en matière de : 1) consommation et émissions lors des transports; 2) réduction des quantités d'énergie de production consommée en amont de l'étape d'exploitation, le long de la chaîne de production.

Si par ailleurs la durée de vie des capteurs et du réservoir (et des systèmes thermiques en général) se voyait prolongée au-delà de 25 ans, l'impact relatif à la production des composantes,

pour chaque mégajoule produit, s'en trouverait amorti et réduit. Une analyse de sensibilité sur la durée de vie des capteurs solaires a été réalisée.

### 3.1.4 Système solaire thermique à collecteur à air vitré

Cette sous-section présente les résultats d'analyse du système solaire thermique à collecteurs à air vitrés. La Figure 3-7 illustre les contributions relatives de chacune des étapes du cycle de vie à l'impact global engendré par le système.



**Figure 3-7 : Contribution environnementale des étapes du cycle de vie du système solaire thermique à collecteurs à air vitrés, par MJ produit (IMPACT 2002+).**

L'analyse de ce système fait ressortir que :

- L'étape de production domine le profil de cinq des six indicateurs considérés (tous à l'exception de *Qualité des écosystèmes*) ;
- L'étape d'utilisation contribue à une part significative des impacts potentiels dans cinq catégories d'indicateurs, et elle domine le profil d'impacts en *Qualité des écosystèmes* ;
- L'étape de fin de vie des systèmes contribue de manière imperceptible au profil pour l'ensemble des indicateurs.

#### Étape de production

Tel que c'était le cas pour les systèmes thermiques à circulation de fluide, l'analyse de contribution relative au système thermosolaire à collecteurs à air vitrés illustre la prépondérance des dommages associés à l'étape de production des composantes. Cette fois, c'est la production des capteurs solaires et celle du système de ventilation qui, ensemble, s'approprient entre 61 et 73 % des impacts et dommages dans toutes les catégories, à l'exception de l'indicateur *Qualité des écosystèmes*. Pour cet indicateur, l'étape de production contribue également de manière importante (à 25 %), mais l'étape d'utilisation domine nettement.

La prépondérance de l'étape de production du système dans toutes les catégories d'indicateurs s'explique en grande partie par le fait que l'énergie d'arrière-plan nécessaire à la production des composantes provient de la combustion de ressources fossiles (charbon, de gaz naturel, etc.).

Celles-ci sont très riches en carbone et leurs procédés de transformation sont émetteurs de nombreux et importants polluants (atmosphériques et hydriques notamment).

### Étape de distribution

L'étape de distribution contribue entre 2 % (*Qualité des écosystèmes*) et 17 % (*Eutrophisation aquatique*) des impacts selon les indicateurs. La contribution de cette étape du cycle de vie aux impacts totaux est uniquement liée au transport des composantes, du distributeur jusqu'au lieu d'installation (distance posée de 500 km).

### Étape d'utilisation

L'étape d'utilisation domine le profil de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* en accaparant 70 % des impacts et contribue à entre 11 et 26 % de l'impact pour les cinq autres indicateurs. Avec l'étape de production, elle constitue donc l'un des principaux contributeurs du cycle de vie du système solaire à collecteurs à air vitrés. C'est la consommation d'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du ventilateur qui est ici en cause.

L'importance accrue de l'étape d'utilisation pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes* est encore une fois attribuable aux impacts découlant de la production et de la distribution de l'électricité nécessaire au fonctionnement du système et issue du réseau d'Hydro-Québec. Se référer à la Figure 3-2 pour le détail des contributeurs environnementaux potentiels liés à la consommation électrique.

### Étape de fin de vie

L'étape de fin de vie contribue à moins de 1 % de tous les indicateurs évalués. La contribution de cette étape du cycle de vie aux impacts totaux s'avère donc marginale et ne constitue pas un point chaud cycle de vie du système solaire thermique à collecteurs à air.

### Analyse des paramètres clés

Les impacts associés aux opérations de production des composantes du système solaire thermique à air ressortent comme dominants dans cinq catégories sur six, soit en *Santé humaine*, *Changements climatiques*, *Ressources*, *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*. Encore une fois, ce résultat est en grande partie attribuable à la fabrication des composantes ailleurs qu'au Québec (qui implique une utilisation plus importante d'énergie générée à partir de charbon et d'autres combustibles fossiles), en particulier la production de l'aluminium. Une attention particulière devrait donc être portée à la masse des composantes, ainsi qu'au lieu de production des matériaux. Dans la perspective d'éventuelles réductions des quantités de matière utilisées pour la fabrication des composantes les plus contributrices (soit les capteurs et le système de ventilation), des gains pourraient se concrétiser en matière de : 1) consommation et émissions lors des transports; 2) réduction des quantités d'énergie de production consommée en amont de l'étape d'exploitation, le long de la chaîne de production.

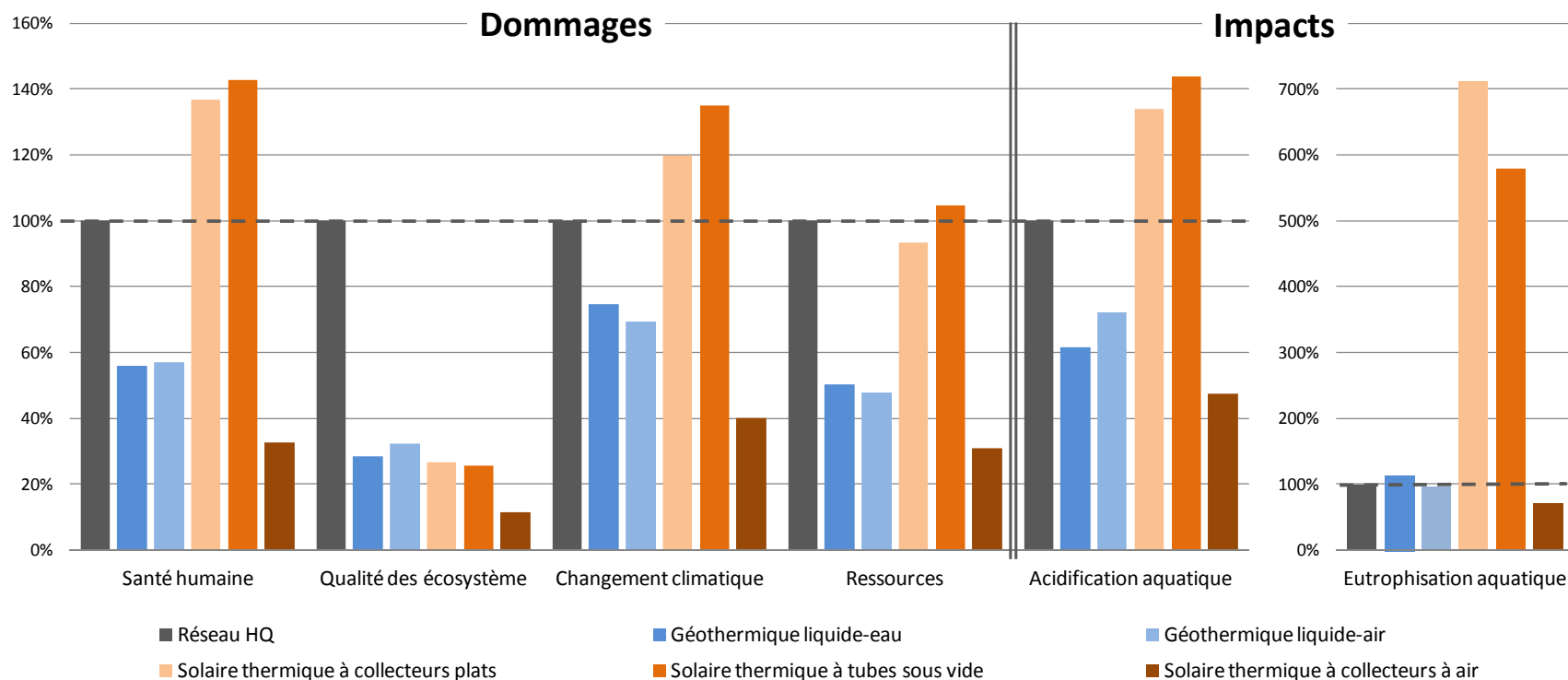
La durée de vie du système solaire thermique (évaluée à 37,5 ans) s'avère d'emblée plus longue que celle des systèmes thermiques à circulation de liquide. Une analyse de sensibilité sur la durée de vie de tels systèmes a été réalisée.

### 3.2 Comparaison environnementale des systèmes sur la base de la production de 1 MJ d'énergie

Le deuxième objectif de l'étude était de comparer les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique entre eux et avec le système de référence. Les résultats d'indicateurs (*Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Changement climatique, Ressources* et les deux catégories d'impacts *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*) sont présentés de manière relative, en employant le chauffage électrique (plinthes et chauffe-eau) alimenté par le réseau d'Hydro-Québec comme référence (100 %).

La Figure 3-8 présente la comparaison des systèmes à l'étude sur la base de la production de 1 MJ d'énergie thermique, tel que défini par l'unité fonctionnelle. L'indicateur *Eutrophisation aquatique* y est illustré à part, à cause de son échelle beaucoup plus grande qui, s'il avait été combiné aux autres, aurait empêché de voir le détail des résultats.

Globalement, il en ressort que, toutes proportions gardées, les deux systèmes géothermiques présentent des profils semblables, de même que les deux systèmes thermosolaires à circulation de liquide.



**Figure 3-8 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au MJ d'électricité distribué par Hydro-Québec et utilisé pour le chauffage des espaces ou de l'eau sanitaire (méthode IMPACT 2002+).**

Le chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec (qui correspond à la valeur de 100 % présenté à la Figure 3-8) est favorisé par rapport à certains systèmes de production d'énergie renouvelable évalués et défavorisé par rapport à d'autres, selon les indicateurs environnementaux considérés. Par contre, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* favorise tous les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique, à cause des émissions toxiques au sol potentiellement engendrées par le réseau de distribution du système de référence (poteaux de bois traité). Cependant, comme mentionné à la sous-section 3.1.1, les modèles de caractérisation actuellement disponibles ont tendance à surestimer l'impact potentiel des métaux émis au sol, engendrant d'importantes incertitudes pour cet indicateur. Une différence d'un ou deux ordres de magnitude est généralement souhaitée pour affirmer avec confiance qu'une option est préférable à une autre pour les impacts de nature écotoxicologique. Afin de tester la robustesse des résultats de cette catégorie de dommage, une analyse de sensibilité avec une seconde méthode d'évaluation a été réalisée (détail à la sous-section 3.5.1) et a montré que les tendances observées ne sont pas constantes entre les deux méthodes. Il est donc difficile de conclure sur la base de l'indicateur *Qualité des écosystèmes* et pour ne pas apporter de confusion, il a été choisi de retirer cet indicateur pour la suite de l'analyse générale. Une nuance sur le sujet est cependant apportée à la section 3.6.

De manière plus spécifique, on constate que par rapport au scénario de référence de chauffage électrique et sur la base d'un MJ produit<sup>7</sup> :

- le **système thermosolaire à collecteur à air** présente un bénéfice environnemental potentiel selon tous les indicateurs environnementaux évalués. Le gain varie de 29 % (pour la catégorie d'impact *Eutrophisation aquatique*) à 69 % (pour l'indicateur *Ressources*) ;
- les **systèmes géothermiques** présentent une réduction d'au moins 25 % de l'impact environnemental pour les indicateurs *Santé humaine*, *Changement climatique*, *Ressources* et *Acidification aquatique*. Par ailleurs, les systèmes géothermiques liquide-eau et liquide-air sont équivalents au système de référence selon l'indicateur *Eutrophisation aquatique* ;
- pour les **systèmes solaires thermiques à collecteurs plats ou à tubes sous vide**, l'indicateur *Ressources* présente des résultats similaires au système de référence (étant donné les incertitudes des modèles de caractérisation). Pour les autres indicateurs, les systèmes thermosolaires à circulation de fluide présentent une augmentation de la charge environnementale par rapport au chauffage électrique. Cette augmentation passe de 20 % (en *Changement climatique*) à un facteur de 6,1 (en *Eutrophisation aquatique*) pour le système thermosolaire à collecteurs plats et de 35 % (en *Changement climatique*) à un facteur de 4,8 (en *Eutrophisation aquatique*) pour le système thermosolaire à tubes sous vide. Encore une fois, l'indicateur *Eutrophisation aquatique* est principalement lié à l'élimination du propylène glycol utilisé comme antigel dans ces systèmes, donc à considérer avec prudence, alors que l'indicateur *Changement climatique* est dominé par l'énergie nécessaire à la production des composantes (voir détail à la sous-section 3.1.3).

---

<sup>7</sup> Il est possible de se référer aux profils environnementaux décrits précédemment pour comprendre les écarts entre les systèmes.



- Autres éléments de comparaison :
  - Les systèmes géothermiques nécessitent des infrastructures beaucoup plus lourdes que les systèmes thermosolaires. La quantité de matériaux requis et les étapes d'installation sont donc plus importantes. Par contre, la durée de vie de 50 ans des composantes d'envergure (boucle souterraine, plancher radiant et système de ventilation) est deux fois plus longue que celle des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide et 1,5 fois plus longues que celle du système solaire à collecteurs à air, ce qui a pour effet d'amortir les impacts liés aux étapes de **production** des composantes et de **distribution** ;
  - À l'étape d'**utilisation** le système solaire à collecteurs plats ne consomme que très peu d'énergie (0,06 MJ pour chaque MJ produit par rapport à 0,26 MJ pour un système géothermique). Malgré cela, les systèmes géothermiques sont avantagés au Québec, puisque le mélange énergétique est « propre », compensant pour son rendement énergétique inférieur.

Notons que la section 3.6 résume les résultats de l'ensemble des analyses réalisées, incluant les analyses de sensibilité qui suivent, afin de mieux cerner les conditions qui confirment ou qui modifient ces conclusions.

### 3.3 Comparaison des systèmes sur la base de la demande en énergie d'une résidence moyenne

Les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique comparés permettent tous de chauffer de l'air ou de l'eau sanitaire. Par contre, du fait de leurs capacités de production bien différentes, chacune des technologies peut combler une part plus ou moins importante de la demande annuelle totale d'une résidence. Le Tableau 3-1 offre une synthèse des informations relatives à la capacité de chacun des systèmes à remplir la demande totale de la résidence québécoise moyenne en énergie thermique.

**Tableau 3-1 : Part de la demande totale en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise comblée par chacun des cinq systèmes à l'étude**

Système	Rendement annuel total	Part de la demande totale comblée	Part de la demande comblée*	
			Chauffage	Eau chaude
Géothermique liquide-eau	72 000 MJ (20 000 kWh)	81 %	100 %	14 %
Géothermique liquide-air	72 000 MJ (20 000 kWh)	81 %	100 %	14 %
Solaire thermique à coll. plats	11 640 MJ (3234 kWh)	13 %	0 %	51 %
Solaire thermique à tubes sous vide	18 744 MJ (5 207 kWh)	21 %	14 %	41 %
Solaire thermique à coll. à air	10 800 MJ (3 000 kWh)	12 %	16 %	0 %

Note : la demande totale annuelle d'une résidence (excluant l'énergie nécessaire au fonctionnement des électroménagers) est évaluée à 24 660 kWh, de laquelle 75 % vont au chauffage des espaces et 25 % au chauffage de l'eau sanitaire. Pour plus de détail sur les hypothèses relatives à la demande d'une résidence québécoise moyenne, se référer à la sous-section 3.3.1 et à l'annexe C.

\* Le reste de la demande étant comblée par le réseau d'Hydro-Québec.

Du fait des différences entre les capacités des systèmes de production d'énergie thermique décentralisée, il s'avère nécessaire d'introduire une seconde comparaison des systèmes, basée

sur la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne. En effet, une technologie peut très bien performer en tant que mesure d'efficacité énergétique (par MJ moyen produit, tel que discuté à la section précédente), mais présenter une performance moins intéressante lorsque prise comme élément d'un scénario global de production d'énergie visant à combler l'ensemble de la demande énergétique de la résidence.

### 3.3.1 Définition de scénarios

La demande annuelle en énergie thermique (chauffage et eau chaude) d'une résidence « moyenne » au Québec en 2011 a été utilisée comme base de comparaison. Une maison unifamiliale de 150 m<sup>2</sup> logeant quatre personnes a ainsi été choisie pour représenter ce scénario moyen.

La demande en énergie associée à une telle résidence a été estimée grâce au site « *Comparer vos coûts d'énergie* » de l'Agence de l'efficacité énergétique (Internet). Afin d'obtenir une estimation des coûts associés au chauffage de l'air et de l'eau, il a été posé que :

- La résidence était située au Québec, de type unifamilial, d'une superficie de 150 m<sup>2</sup> et conçue pour quatre personnes ;
- L'année de construction a été choisie comme une variable, et sa valeur a été modulée entre 1940 et 2010 par incréments de 10 ans.

Une série de coûts (chauffage, électroménagers et eau chaude) variant en fonction de l'année construction de la résidence a donc été obtenue. Au moment de la simulation (mars 2011), la part des coûts totaux attribuables au chauffage des espaces variait entre 53,6 % (pour une résidence construite après 1990) et 68,4 % (pour une construction de 1940); et celle attribuable au chauffage de l'eau variait entre 14 % (pour une construction de 1940) et 20,6 % (pour une résidence construite après 1990). La balance des coûts totaux (entre 17,6 % et 25,8 %) est associée à la consommation électrique des électroménagers et n'est pas comprise dans le champ de la présente étude.

Connaissant le coût unitaire du kilowattheure (0,0827 \$/kWh en mars 2011), la consommation énergétique d'une résidence a été calculée en fonction de son année de construction. La distribution du nombre de logements du parc résidentiel québécois en fonction de l'année de construction, rendue disponible par Statistiques Canada (2006), a finalement permis de calculer une moyenne pondérée reflétant la consommation énergétique attribuable au chauffage des espaces et de l'eau en contexte résidentiel québécois. En somme, il ressort qu'entre 10 875 et 19 080 kWh/an (soit en moyenne 75 % de l'énergie thermique) seraient consacrés au chauffage et entre 5 580 et 7 125 kWh/an (soit en moyenne 25 % de l'énergie thermique) seraient consacrés à la production d'eau chaude sanitaire.

Six scénarios permettant de répondre à cette demande énergétique ont été établis. Un important travail de modélisation a servi à rendre ces scénarios fonctionnellement équivalents (c.-à-d. pour assurer le chauffage d'une même quantité d'air et d'eau). Ainsi, chacun d'eux correspond à une des technologies étudiées, en prenant en compte leurs spécificités et leur capacité de production (le détail de ces scénarios est présenté à l'Annexe C et résumé au Tableau 3-1) :

- **Scénario de référence** : l'énergie de chauffage et de production de l'eau chaude sanitaire est à 100 % fournie par le réseau d'Hydro-Québec. Des plinthes électriques (1 000 W) et un chauffe-eau électrique (60 gallons) ont été inclus au scénario.
- **Scénario 1A** : l'énergie de chauffage est à 100 % fournie par le système géothermique liquide-eau, qui produit également 14 % de l'eau chaude sanitaire. Le reste de l'énergie nécessaire (soit 86 % de l'énergie de production de l'eau chaude) est fourni par le réseau d'Hydro-Québec.
- **Scénario 1B** : l'énergie de chauffage est à 100 % fournie par le système géothermique liquide-air, qui produit également 14 % de l'eau chaude sanitaire. Le reste de l'énergie nécessaire (soit 86 % de l'énergie de production de l'eau chaude) est fourni par le réseau d'Hydro-Québec.
- **Scénario 2A** : l'énergie de production de l'eau chaude sanitaire est à 50 % fournie par le système thermosolaire à collecteurs plats. Le reste de l'énergie nécessaire (soit 100 % de l'énergie de chauffage et 50 % de l'énergie de production de l'eau chaude) est fourni par le réseau d'Hydro-Québec.
- **Scénario 2B** : l'énergie de chauffage est à 14 % fournie par le système thermosolaire à tubes sous vide, qui produit également 41 % de l'eau chaude sanitaire. Le reste de l'énergie nécessaire (soit 86 % de l'énergie de chauffage et 59 % de l'énergie de production de l'eau chaude) est fourni par le réseau d'Hydro-Québec.
- **Scénario 2C** : l'énergie de chauffage est à 16 % fournie par le système thermosolaire à collecteurs à air vitrés. Le reste de l'énergie nécessaire (soit 84 % de l'énergie de chauffage et 100 % de l'énergie de production de l'eau chaude) est fourni par le réseau d'Hydro-Québec.

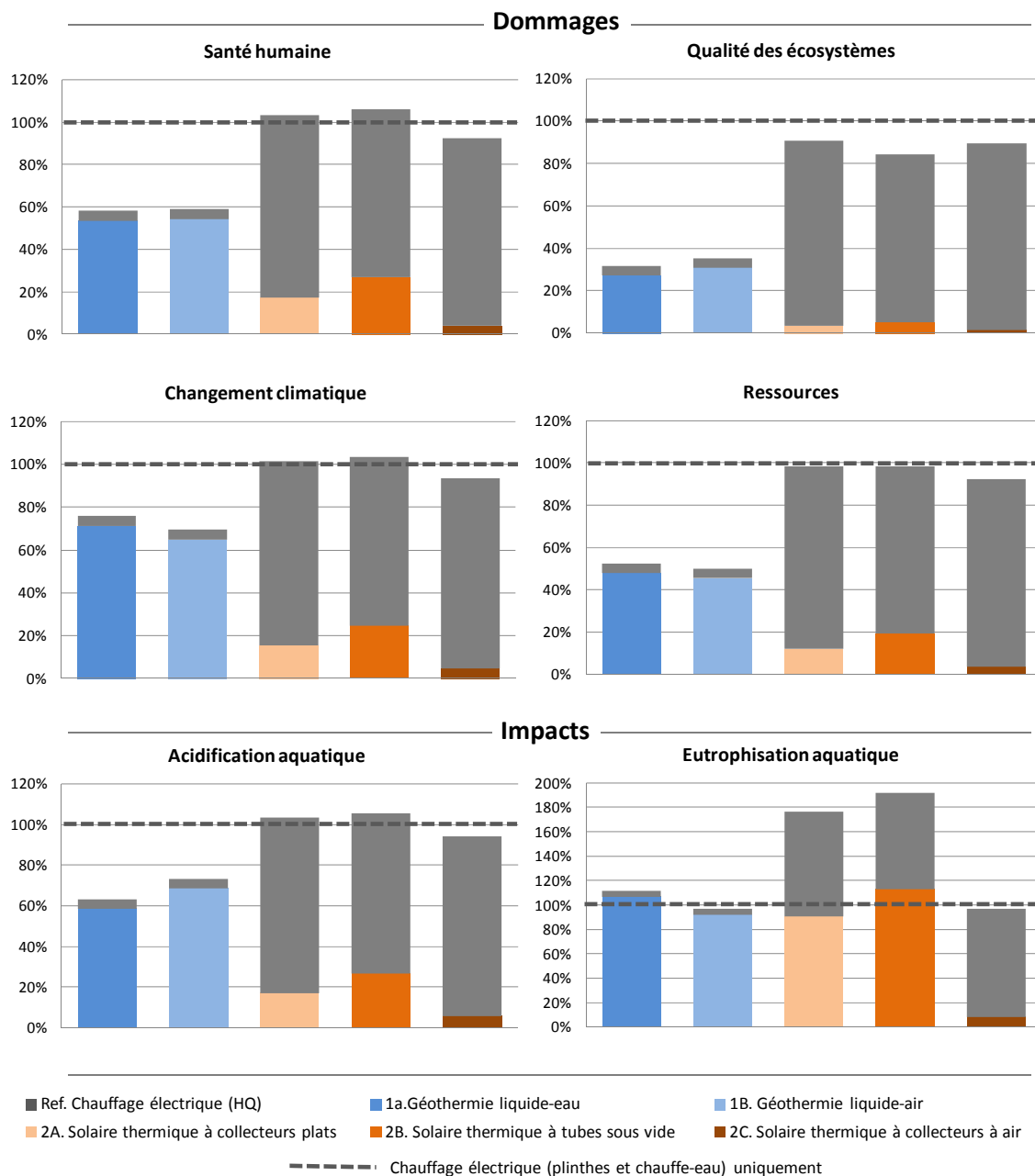
### 3.3.2 Résultats comparatifs

La Figure 3-9 présente l'analyse comparée des profils de cycle de vie des six scénarios de production d'énergie thermique définis plus haut. Comme précédemment, les résultats d'indicateurs (*Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Changement climatique*, *Ressources* et les deux catégories d'impacts *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*) sont présentés de manière relative, en employant le chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec comme base de normalisation (100 %). Le trait pointillé indique ce scénario de référence.

Pour chacun des indicateurs, cinq colonnes représentent les cinq scénarios considérés. La partie colorée de chaque colonne indique donc la part des impacts totaux attribuable à la technologie de production d'énergie décentralisée considérée, alors que la partie grisée indique la part attribuable au système de chauffage complémentaire (à base d'énergie issue du réseau d'Hydro-Québec), nécessaire pour combler la totalité de la demande de la résidence. Enfin, les scénarios ayant un avantage environnemental potentiel par rapport au chauffage électrique présentent des résultats inférieurs à 100 % (barres sous le trait pointillé).

Comme pour l'analyse précédente, l'indicateur *Qualité des écosystèmes* ne permet pas de départager les options comparées. En effet, les incertitudes sur les modèles de caractérisation employés font en sorte qu'il n'est pas possible de conclure quant à la meilleure performance d'un scénario sur un autre s'il n'y a pas une différence d'un ou deux ordres de magnitude pour les impacts de nature écotoxicologique. Les résultats de cette catégorie de dommage sont donc exclus l'interprétation qui suit.

L'Annexe E présente le détail des résultats.



**Figure 3-9 : Profils environnementaux des scénarios permettant de combler la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne en 2011 (IMPACT 2002+).**

La Figure 3-9 permet tout d'abord de constater que pour les scénarios géothermiques (1A et 1B), la part des impacts attribuable à la technologie de production d'énergie décentralisée est nettement supérieure à celle attribuable au réseau d'Hydro-Québec. Cette tendance est représentative de l'ensemble des indicateurs et s'explique par le fait que les systèmes géothermiques sont en mesure de remplir à eux seuls 81 % de la demande totale en énergie thermique d'une résidence (voir Tableau 3-1).

À l'opposé, pour les scénarios construits à partir des technologies solaires (2A, 2B et 2C), une part considérable de leur score total (entre 79 et 89 % selon les systèmes) est attribuable à la source d'énergie complémentaire issue du réseau. Cette tendance est d'autant plus marquée que la capacité des systèmes solaires à combler la demande en énergie thermique de la résidence est réduite (voir le Tableau 3-1). En effet, selon cette capacité, les impacts ou les bénéfices environnementaux engendrés par la technologie (observés à la section 3.2) s'en trouvent accentués. Le positionnement des scénarios évalués par rapport au scénario de référence (c.-à.-d. au-dessus ou en deçà de la ligne pointillée sur la Figure 3-9) est donc déterminé par deux facteurs :

- la performance environnementale de la technologie solaire par MJ d'énergie thermique produite (représenté à la Figure 3-8) ;
- la capacité plus ou moins grande de la technologie solaire à combler la demande (Tableau 3-1).

Plus globalement, il ressort que les tendances de classement sont similaires pour tous les indicateurs à l'exception du potentiel d'*Eutrophisation aquatique*. Aussi, pour les indicateurs *Santé humaine*, *Changement climatique*, *Ressources* et *Acidification aquatique*, les scénarios de production d'énergie à base de géothermie se démarquent avantageusement, d'un point de vue environnemental, par rapport aux autres.

Deux groupes de performance se distinguent donc :

- les scénarios à base de **géothermie**, qui présentent des scores totaux significativement inférieurs à ceux du scénario de référence;
- les scénarios à base d'**énergie solaire thermique**, qui présentent une performance très semblable à celle du scénario de référence.

Pour l'indicateur *Eutrophisation aquatique*, les scénarios à base de géothermie sont équivalents au système de référence et au système solaire à collecteur à air (2C) (compte tenu des incertitudes sur les modèles de caractérisation). Les deux systèmes solaires à circulation de liquide (2A et 2B) sont cependant désavantagés dans cette catégorie.

### Analyse des paramètres clés

Pour les systèmes géothermiques et le système solaire thermique à collecteur à air, la part de la demande totale en énergie thermique comblée par le système décentralisé ressort comme un facteur déterminant dans cinq catégories d'indicateurs sur les six. Ainsi, malgré le fait que le système thermosolaire à collecteurs à air se soit présenté comme étant la mesure d'efficacité énergétique la plus intéressante par MJ d'énergie produite (Figure 3-8), sa performance en tant que scénario pour répondre à la demande énergétique d'une résidence (Figure 3-9) est inférieure ou équivalente (compte tenu des incertitudes sur les modèles de caractérisation) aux scénarios à base de géothermie.

L'articulation entre les paramètres « performance » et « capacité » est représentée par la Figure 3-10. Ces graphiques illustrent les impacts environnementaux potentiels associés à la demande

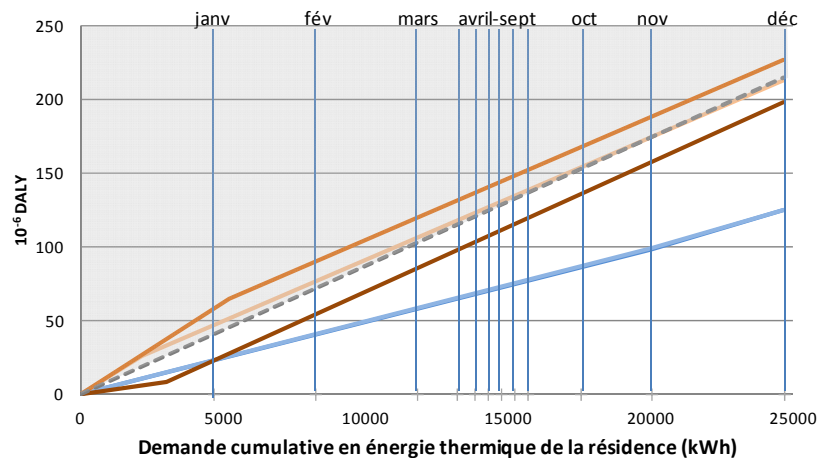
en énergie thermique (chauffage et eau chaude) d'une résidence québécoise moyenne au fil de l'année. Chacune des lignes de couleur y représente l'un des scénarios étudiés et la ligne en traits pointillés représente le scénario de référence. Ainsi, lorsqu'un scénario impliquant une production décentralisée présente moins d'impact potentiel que l'utilisation du réseau, sa courbe se trouve en dessous de la ligne de référence. Au contraire, la zone grisée des graphiques indique que la production décentralisée se traduit par une augmentation nette des charges environnementales.

Le fait de présenter la demande en énergie thermique dans le temps permet de visualiser la part de la consommation annuelle de la résidence qui est comblée par la technologie de production décentralisée. Plus une technologie est performante (impact/MJ produit) et plus sa pente sera faible. Une fois sa capacité de production atteinte, le reste de la demande annuelle est assurée par le réseau électrique (ce qui explique que la pente de toutes les courbes devient équivalente à celle du scénario de référence plus ou moins rapidement dans l'année).

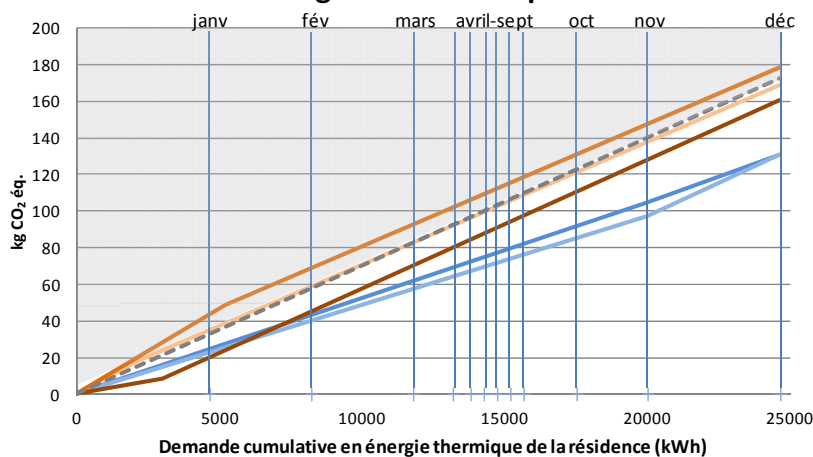
- Le **système solaire thermique à collecteurs à air**, dont la performance (en impact/MJ produit) est la meilleure parmi toutes les options comparées, a une faible capacité de production (3 000 kWh). Il ne pourrait notamment pas répondre à la demande du premier mois de l'année. Par conséquent, tout le reste de la consommation en énergie thermique de la résidence est assuré par le réseau. Ainsi, au bout de l'année (après 24 660 kWh consommés), le système solaire thermique à collecteurs à air a un impact cumulatif supérieur à celui des systèmes géothermiques pour tous les indicateurs, à l'exception de l'*Eutrophisation aquatique*, où la technologie solaire à air est équivalente au scénario de référence.
- Pour tous les indicateurs à l'exception du potentiel d'*Eutrophisation aquatique*, les **systèmes géothermiques** deviennent globalement préférables dès lors que la demande énergétique dépasse celle des deux premiers mois de l'année.

## Dommages

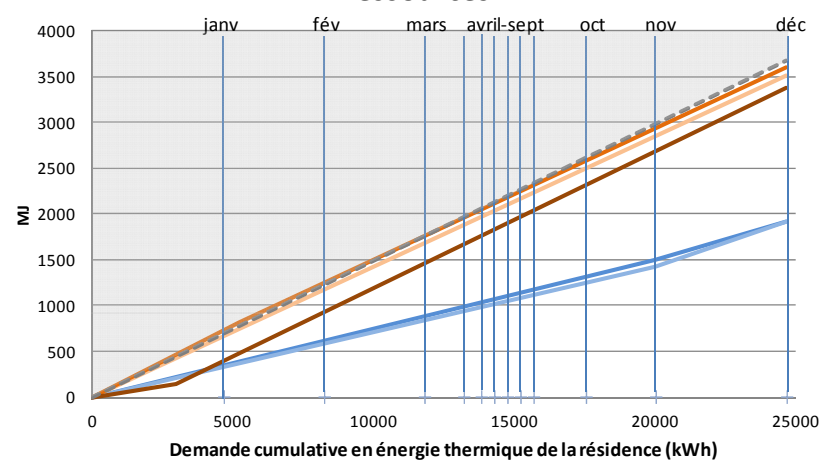
### Santé humaine



### Changement climatique



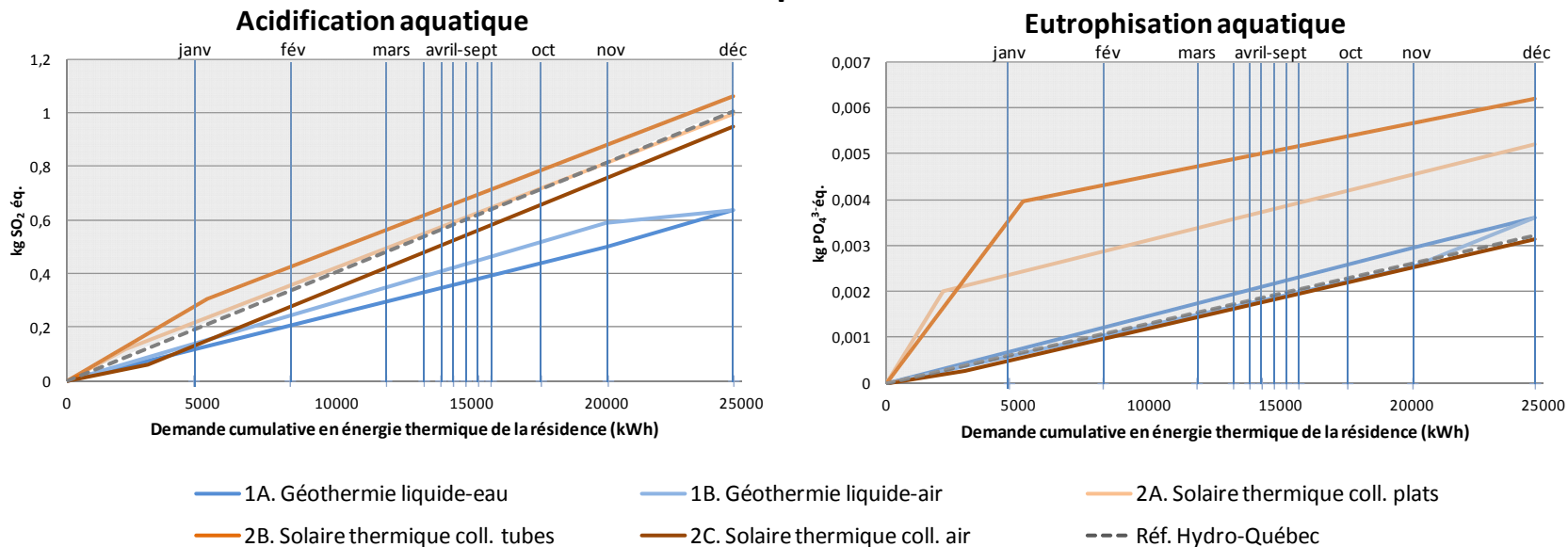
### Ressources



- 1A. Géothermie liquide-eau      — 1B. Géothermie liquide-air      — 2A. Solaire thermique coll. plats
- 2B. Solaire thermique coll. tubes      — 2C. Solaire thermique coll. air      - - - Réf. Hydro-Québec

**Figure 3-10 : Comparaison des performances environnementales des scénarios de production décentralisée d'énergie thermique, sur la base de leur capacité à répondre à la demande annuelle d'une résidence québécoise moyenne (IMPACT 2002+).**

## Impacts



**Figure 3-10 (suite): Comparaison des performances environnementales des scénarios de production décentralisée d'énergie thermique, sur la base de leur capacité à répondre à la demande annuelle d'une résidence québécoise moyenne (IMPACT 2002+).**



### 3.3.3 Considération de la fonction climatisation

Rappel : De toutes les options évaluées, seul le système géothermique liquide-air permet de climatiser l'air d'une résidence et ce, sans qu'aucune modification ne soit apportée à sa configuration. Aussi, il est rare qu'un tel système ne soit pas employé en été. Pour offrir le même service (c.-à-d. pour inclure la fonction climatisation), les autres systèmes doivent être jumelés à des climatiseurs externes. Des climatiseurs individuels de type mural ont donc été modélisés, avec leur consommation énergétique annuelle afin de comparer les systèmes dans une perspective plus globale.

Pour climatiser une résidence québécoise moyenne de 150 m<sup>2</sup> dans son ensemble – comme le permet un système géothermique liquide-air – il a été posé que trois climatiseurs de 18 000 BTU (3,5 kW) étaient nécessaires. Leur production (principales composantes) a été modélisée à partir des informations fournies par Grignon-Masse (2010). Une consommation d'énergie liée à la climatisation par climatiseur individuel de 25,7 MJ/m<sup>2</sup>.an (moyenne québécoise en 2009, tiré de l'Office de l'efficacité énergétique (Internet)) a été considérée, pour un total de 3 855 MJ/an.

Les six scénarios précédents ont donc été modifiés de la manière suivante pour y ajouter la fonction climatisation (les éléments mentionnés à la sous-section 3.3.1 pour le chauffage et la production d'eau chaude s'appliquent toujours) :

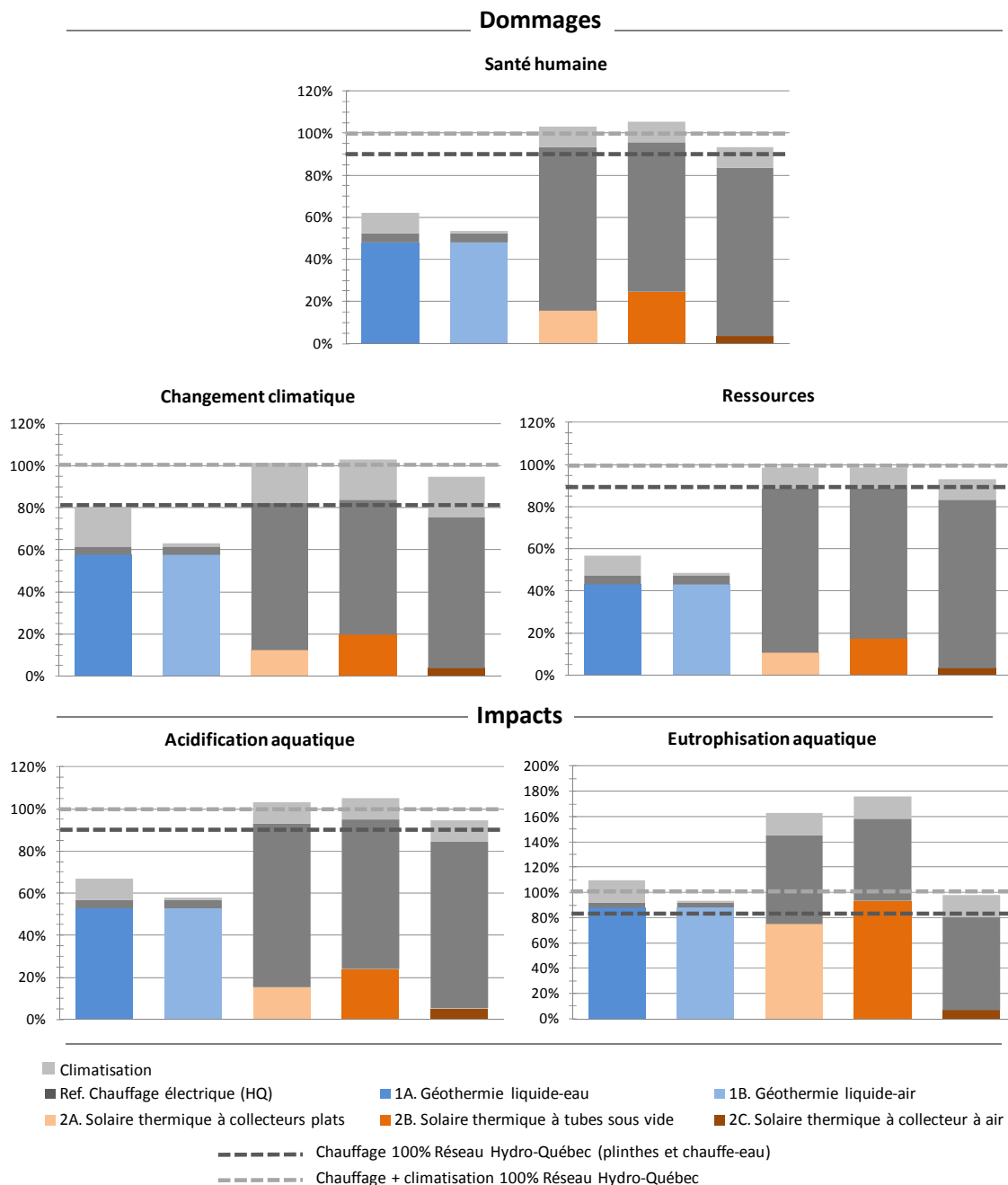
- **Scénario 1B** : la climatisation est à 100 % fournie par le système géothermique liquide-air. Seule son opération a été considérée, comprenant la consommation électrique, le réfrigérant, l'entretien et les émissions fugitives de réfrigérant.
- **Pour tous les autres scénarios**, la climatisation est fournie par 3 climatiseurs de 18 000 BTU ayant une durée de vie de 12 ans (tel que suggéré par Grignon-Masse (2010), confirmé pour le contexte québécois par Desrochers (2012) et Ressources Naturelles Canada (2011)). Leur production et leur opération ont été considérées. L'opération inclut la consommation électrique et les émissions fugitives de réfrigérant (il est posé qu'aucun réfrigérant n'est ajouté au cours de la durée de vie).

La Figure 3-11 reprend les résultats comparatifs présentés précédemment pour le chauffage et la production d'eau chaude, et y ajoute les impacts potentiels attribuables à la climatisation. La base de référence (100 %) employée ici est le scénario où la résidence est climatisée par climatiseurs muraux et où le chauffage et l'eau chaude sont assurés entièrement par le réseau d'Hydro-Québec. Le trait pointillé foncé rappelle les résultats sans climatisation pour fins de comparaison, alors que le trait pointillé plus pâle illustre le cas où la climatisation est ajoutée au scénario de référence. La comparaison de ces deux traits montre que les impacts potentiels attribuables à la consommation énergétique annuelle d'une résidence moyenne québécoise sont augmentés de 5 à 19 % du fait de l'ajout de climatisation<sup>8</sup>. Il en va de même pour tous les scénarios impliquant l'utilisation de climatiseurs individuels.

En ce qui a trait au scénario incluant le système géothermique liquide-air, seule une augmentation de 1 à 2 % des impacts potentiels est observée, du fait que l'infrastructure n'est pas modifiée et que seul le temps d'opération de la machine est augmenté.

<sup>8</sup> Il est à noter que le nombre de climatiseurs muraux installés a un effet direct sur les résultats. Ainsi, on peut estimer qu'une résidence qui utiliserait deux climatiseurs au lieu des trois considérés dans la présente analyse verrait les impacts potentiels de sa climatisation réduits du tiers, présentant des indicateurs environnementaux de 3 à 13 % plus élevés que pour une résidence sans climatisation.

Il ressort de cette analyse que la considération de la fonction climatisation a pour effet de creuser l'écart entre la géothermie liquide-air et les autres options. De plus, le système géothermique liquide-eau demeure une option intéressante, puisque même en y ajoutant des climatiseurs muraux, elle présente moins d'impacts potentiels que le scénario de référence incluant la climatisation dans toutes les catégories, sauf *Eutrophisation aquatique* où le système géothermique est équivalent à la référence (compte tenu des incertitudes sur les modèles de caractérisation). Les conclusions générales présentées précédemment restent donc inchangées.



**Figure 3-11 : Profils environnementaux des scénarios permettant de combler la demande en énergie thermique et en climatisation d'une résidence québécoise moyenne en 2011 (IMPACT 2002+).**

L'utilisation de thermopompes murales multizones permettant à la fois de climatiser et de chauffer les espaces pourrait également présenter un avantage par rapport au scénario de référence sélectionné. Cette option n'a cependant pas été évaluée, puisqu'elle sort du champ de la présente étude.

#### Globalement, on retient que...

Sur la base de la production de 1 MJ, la comparaison des cinq systèmes de production décentralisée d'énergie thermique favorise le **système solaire thermique à collecteurs à air**, qui présente la meilleure performance potentielle selon tous les indicateurs environnementaux considérés.

Sur la base de la production de 1 MJ, les **systèmes géothermiques liquide-eau et liquide-air** présentent également un gain environnemental potentiel par rapport au chauffage de référence (plinthes et chauffe-eau électriques) pour tous les indicateurs à l'exception du potentiel d'eutrophisation aquatique, pour lequel ils sont équivalents au système de référence.

Pour répondre à la demande en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise, les **scénarios à base de géothermie** présentent une performance environnementale potentielle significativement supérieure à celle des autres scénarios, du fait qu'ils sont en mesure de remplir à eux seuls plus de 80 % des besoins de la résidence.

Lorsque la climatisation est prise en compte, le **système géothermique liquide-air** est généralement favorisé par rapport aux autres scénarios. La géothermie liquide-eau reste également une option à favoriser, même en y ajoutant des climatiseurs muraux pour répondre aux besoins de climatisation.

Pour tous les indicateurs à l'exception du potentiel d'*Eutrophisation aquatique*, les **systèmes géothermiques** deviennent globalement préférables dès lors que la demande énergétique dépasse celle des deux premiers mois de l'année.

### 3.4 Qualité des données d'inventaire

Les résultats de l'analyse de la qualité des données d'inventaire sont résumés à l'Annexe D du présent rapport.

À partir de ces analyses, il est possible de constater que dans l'ensemble, les données employées pour l'analyse sont jugées acceptables. Celles-ci permettent en effet de fournir une vue d'ensemble des systèmes évalués, même si peu de données primaires (auprès des producteurs et fournisseurs de systèmes de production d'énergie thermique décentralisée à petite échelle) ont été collectées dans le cadre de ce projet.

Dans l'ensemble, pour augmenter la robustesse des résultats de la présente étude, il faudrait procéder à une collecte de données spécifiques auprès des acteurs du milieu au Québec.

### 3.5 Analyses de sensibilité

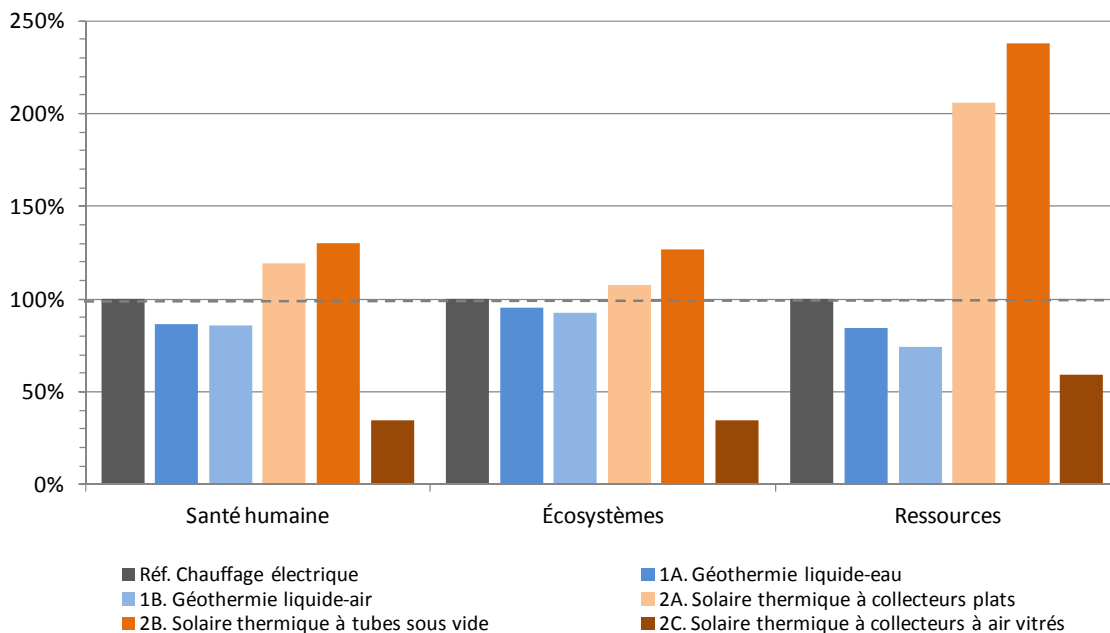
Des analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de l'étude. Les résultats détaillés sont présentés à l'Annexe E.

#### 3.5.1 Évaluation des impacts avec la méthode ReCiPe

Comme mentionné précédemment, l'évaluation des impacts du cycle de vie a été réalisée avec la méthode ReCiPe (Goedkoop et coll., 2009), afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

La Figure 3-12 présente la comparaison environnementale des systèmes par rapport au MJ fourni par le système électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec, selon les indicateurs de dommage de la méthode ReCiPe.

Globalement, cette analyse confirme que, par MJ produit : le système solaire thermique à collecteurs à air est l'option qui présente le moins d'impacts potentiels; les systèmes géothermiques sont généralement plus avantageux que le chauffage électrique de référence; les systèmes solaires thermiques à circulation de liquide présentent plus d'impacts potentiels que le chauffage électrique de référence. Les différences entre les systèmes comparés sont cependant plus nuancées. Notamment, l'indicateur *Ecosystèmes* de ReCiPe ne défavorise pas le chauffage électrique comme c'est le cas pour IMPACT 2002+.



**Figure 3-12 : Comparaison environnementale des systèmes à l'étude par rapport au MJ d'électricité distribué par Hydro-Québec et utilisé pour le chauffage des espaces ou de l'eau sanitaire (méthode ReCiPe).**

Le Tableau 3-2 résume les résultats divergents entre les deux méthodes pour certaines catégories d'impact (résultats non présentés dans le corps du rapport, mais disponibles à l'Annexe E).

**Tableau 3-2 : Comparaison des résultats d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) divergents entre les méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe**

Catégorie d'impact	Différences observées	Explication
<b>Global Warming (IMPACT 2002+) / Climate Change (ReCiPe)</b>  Équivalent à la catégorie de dommage <i>Changement climatique</i>	Les deux systèmes géothermiques présentent des bénéfices notables par rapport au système de référence selon IMPACT 2002+, alors que ReCiPe indique un impact potentiel légèrement plus élevé pour la géothermie (inversion de la tendance).	La méthode IMPACT 2002+ caractérise les impacts des GES sur un horizon de 500 ans, par opposition à un horizon de 100 ans dans ReCiPe. La divergence entre les deux séries de résultats découle entièrement de cette différence, car les PRG des réfrigérants sont beaucoup plus élevées sur un horizon de 100 ans.
<b>Aquatic ecotoxicity (IMPACT 2002+) / Freshwater ecotoxicity (ReCiPe)</b>  Inclus dans la catégorie de dommage <i>Qualité des écosystèmes / Écosystèmes</i>	Selon IMPACT 2002+, tous les systèmes évalués présentent un bénéfice potentiel en écotoxicité aquatique par rapport au chauffage électrique de référence. Selon ReCiPe, les systèmes solaires à circulation de fluide (collecteurs plats et à tubes sous vide) présentent des impacts nets beaucoup plus importants (inversion de tendance).	Pour l'indicateur <i>Écotoxicité aquatique</i> , des différences fondamentales prévalent entre les deux approches de modélisation des métaux. Ainsi, avec IMPACT 2002+, le profil de l'indicateur est dominé par des émissions de cuivre au sol alors qu'avec ReCiPe, le profil est dominé par des émissions de nickel (sous forme ionique) à l'eau. La divergence entre les deux séries de résultats découle donc des différences entre les hypothèses à la base des modèles de caractérisation des métaux. Notons par ailleurs que l'ensemble des modèles actuellement disponibles et utilisés en ÉICV sont reconnus comme étant très peu robustes eut égard à la caractérisation de métaux émis à l'environnement.
<b>Aquatic Eutrophication (IMPACT 2002+) / Freshwater Eutrophication (ReCiPe)</b>  Inclus dans la catégorie de dommage <i>Écosystèmes</i> de ReCiPe	Selon IMPACT 2002+, les deux systèmes géothermiques présentent un impact potentiel similaire au chauffage électrique de référence. Par contre, ReCiPe indique des bénéfices environnementaux pour ces deux systèmes (augmentation de l'écart).	La méthode IMPACT 2002+ caractérise le potentiel d'eutrophisation aquatique en tenant compte de l'effet potentiel d'une activité sur la DCO (demande chimique en oxygène), alors que cet effet n'est pas pris en compte dans ReCiPe. La divergence entre les deux séries de résultats découle entièrement de ce fait. À noter que ReCiPe provient d'un plus récent et plus large consensus scientifique sur la question.
<b>Terrestrial acidification/nitrification (IMPACT 2002+) / Terrestrial acidification (ReCiPe)</b>  Inclus dans la catégorie de dommage <i>Qualité des écosystèmes / Écosystèmes</i>	Selon IMPACT 2002+, les systèmes géothermiques (et principalement le système liquide-air) sont équivalents au chauffage électrique de référence en ce qui a trait au potentiel d'acidification terrestre. Selon ReCiPe, ces systèmes présentent un bénéfice (augmentation de l'écart).	Pour l'indicateur <i>Acidification terrestre</i> , des différences fondamentales prévalent entre les deux approches de modélisation. Ainsi, IMPACT 2002+ se base sur des facteurs de caractérisation de la méthode ecoindicator 99 et ne prend pas en compte le devenir atmosphérique. Il inclut également le potentiel d'eutrophisation (nitrification) des sols. Au contraire, ReCiPe ne considère que l'acidification et intègre le devenir atmosphérique des substances. Ici encore, la méthode ReCiPe provient d'un plus récent et plus large consensus scientifique sur la question.

Catégorie d'impact	Différences observées	Explication
<b>Non-Renewable Ressource (IMPACT 2002+) / Fossil Depletion (ReCiPe)</b>  Inclus dans la catégorie de dommage <i>Ressources</i>	Selon IMPACT 2002+, les systèmes solaires à circulation de fluide (collecteurs plats et à tubes sous vide) sont équivalents au chauffage électrique de référence sur le plan de l'utilisation des ressources non renouvelables. Selon ReCiPe, ces mêmes systèmes présentent des impacts nets beaucoup plus importants (inversion de tendance), alors que les autres systèmes montrent des bénéfices plus modestes.	Vis-à-vis de ce type d'interactions entre l'être humain et l'environnement (c.-à.-d. des activités d'extractions de ressources naturelles), des différences fondamentales prévalent entre les deux approches de modélisation, en dépit du fait que les indicateurs correspondent l'un à l'autre. En pratique, les tendances observables entre deux séries de résultats, l'une selon l'indicateur <i>Ressources non renouvelables</i> (d'IMPACT 2002+) et l'autre selon l'indicateur <i>Raréfaction des ressources fossiles</i> (de ReCiPe), ne peuvent pas être corrélées. Ici encore, la seconde approche (celle de ReCiPe) provient d'un plus récent et plus large consensus scientifique sur la question

L'analyse plus détaillée présentée au Tableau 3-2 permet donc une mise en perspective des résultats obtenus par IMPACT 2002+. Il en ressort que, par MJ d'énergie thermique produite, il y a une sous-estimation potentielle des impacts liés au **Changement climatique** pour les systèmes géothermiques. L'horizon temporel (100 ans ou 500 ans) sur lequel est calculé le potentiel de réchauffement global des gaz réfrigérants a un effet sur les conclusions. Par ailleurs, les catégories d'impact **Écotoxicité aquatique** (inclus dans la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*) et **Consommation de ressources non renouvelables** (inclus dans la catégorie de dommage *Ressources*) sont potentiellement sous-estimées par IMPACT 2002+ pour les systèmes solaires à circulation de fluide. Ces modifications vont dans le sens général des autres indicateurs environnementaux considérés dans l'analyse de base (Figure 3-8), à savoir que les systèmes solaires thermiques à collecteurs plats et à tubes sous vide sont désavantagés par rapport au système électrique de référence.

Compte tenu de la différence notable de tendance entre les catégories *Qualité des écosystèmes* d'IMPACT 2002+ et celle d'*Écosystèmes* de ReCiPe, et du fait des incertitudes importantes liés aux modèles de caractérisation impliqués, il apparaît difficile de favoriser un système par rapport à l'autre sur la base de l'indicateur *Qualité des écosystèmes*.

### 3.5.2 Contexte énergétique au lieu d'installation

*Rappel : Dans l'analyse initiale, il est considéré que les systèmes de production d'énergie décentralisée étaient installés au Québec et de ce fait, consommaient l'électricité du mélange d'approvisionnement énergétique québécois durant leur étape d'utilisation. Or, l'importante part de l'énergie québécoise produite à partir de centrales hydroélectriques confère à la province un avantage sur le plan environnemental (par rapport à l'Ontario et aux États-Unis notamment, dont la production énergétique est en grande partie dépendante des énergies fossiles que sont le charbon, le gaz naturel et le mazout léger). Afin de tester l'effet du contexte énergétique du lieu d'installation des systèmes, le mélange d'approvisionnement énergétique nord-américain (plus concentré en énergies fossiles) a été employé en analyse de sensibilité pour représenter l'énergie consommée lors de l'utilisation des systèmes et l'énergie du réseau permettant de combler la demande énergétique d'une résidence moyenne en 2011.*

Les résultats obtenus montrent que si les technologies de production décentralisées sont implantées ailleurs, en Amérique du Nord :

- les systèmes géothermiques s'en trouvent désavantagés par rapport aux systèmes solaires thermiques, du fait qu'ils consomment davantage d'électricité par MJ produit à l'étape d'utilisation. Ils restent cependant avantagés par rapport au chauffage de référence ;
- Les systèmes solaires à collecteurs plats et à tubes sous vide deviennent donc plus performants que le chauffage électrique de référence par MJ produit selon tous les indicateurs. La part des impacts de ces deux systèmes solaires à circulation de fluide attribuable à la production des composantes (dominante en contexte québécois) est compensée par l'économie d'énergie qu'ils permettent à l'étape utilisation ;
- Le système solaire à collecteurs à air reste un des plus avantageux, mais perd son avantage par rapport aux autres systèmes solaires étudiés par MJ produit dans toutes les catégories d'indicateurs considérées, à l'exception du potentiel *d'Eutrophisation aquatique*, et ce en raison de la gestion en fin de vie du fluide caloporteur, qui est propre aux systèmes solaires à circulation de liquide.

En supposant que la consommation en énergie thermique d'une résidence moyenne québécoise se rapproche de celle d'une résidence moyenne nord-américaine, l'analyse comparative montre également que les résultats ne sont pas sensibles au changement induit par le contexte énergétique. Rappelons en effet que dans le cadre de cette analyse plus globale, le facteur déterminant de la performance environnementale des scénarios les uns par rapport aux autres s'avère être la capacité du système décentralisé à combler une part significative de la demande de la résidence. Ce constat, effectué à partir du contexte québécois, demeure valide en contexte nord-américain et fait en sorte que sur une année, les systèmes géothermiques deviennent équivalents aux trois systèmes solaires thermiques. Les gains environnementaux supérieurs que les trois systèmes solaires parviennent à engendrer pendant une partie de l'année (par MJ produit) s'avèrent insuffisants pour compenser leur faible capacité de production, qui de surcroît est complémentée par un réseau à forte teneur en énergies fossiles.

La seule différence notable par rapport à la tendance générale observée en contexte québécois : le scénario impliquant un système à tubes sous vide présente une meilleure performance que les deux autres scénarios solaires. Sa capacité de 8 à 9 % supérieure lui permet en effet de combler une part plus importante de la demande de la résidence, atténuant de manière plus importante les impacts du réseau nord-américain.

### **3.5.3 Rendement des systèmes géothermiques**

*Rappel : Dans l'analyse initiale, un système géothermique liquide-eau moyen ayant un coefficient de performance de 3,9 a été modélisé. Par contre, la valeur du COP pour un système géothermique donné peut varier au cours d'une année, notamment en fonction de l'écart de température entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. La sensibilité des résultats à la valeur du COP des systèmes a donc été examinée. L'analyse a été effectuée pour le **système géothermique liquide-eau**, avec des COP variant entre 1,5 et 5,5 (maximum actuellement possible). Le système liquide-air suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.*

Plus la valeur du COP est élevée, plus le système est performant. Or, dès que son COP dépasse 2,5 (en tenant compte des incertitudes), le système géothermique liquide-eau devient

préférable au chauffage électrique de référence pour tous les indicateurs environnementaux, sauf l'indicateur *Eutrophisation aquatique*, pour lequel la géothermie est équivalente au système de référence.

Sur la base de la production d'un MJ, la géothermie reste derrière les systèmes solaires thermiques à collecteur à air, peu importe le COP considéré. Ainsi, le classement des technologies de production de 1 MJ d'énergie thermique reste inchangé. Il en va de même avec le classement des scénarios de production d'énergie thermique aptes à combler la demande d'une résidence québécoise moyenne, qui n'est pas influencé par le paramètre « rendement des systèmes géothermiques », dans l'intervalle évalué.

#### **3.5.4 Rendement des capteurs solaires thermiques à circulation de fluide**

*Rappel : Dans l'analyse initiale, un système thermosolaire à collecteurs plats ayant un rendement de 539 kWh/m<sup>2</sup>.an a été utilisé pour le chauffage de l'eau sanitaire (ce qui correspond à un rendement assez modeste de 39 à 50 % selon l'intervalle d'ensoleillement au Québec). Or, les caractéristiques de performance d'un système peuvent varier considérablement en fonction du modèle de capteur solaire et du niveau d'ensoleillement au lieu d'exploitation du système. La sensibilité des résultats à une variation du rendement des capteurs a donc été effectuée pour le **système à collecteurs plats**, pour des valeurs allant de 539 à 700 kWh/m<sup>2</sup> (soit un rendement de 50 à 65 % selon les conditions d'ensoleillement). Le système à tubes sous vide suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.*

Toute augmentation du rendement annuel moyen du système solaire thermique à collecteurs plats réduit ses impacts environnementaux potentiels. Pour que l'énergie thermique produite par ce type de système solaire soit préférable à celle du chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec selon tous les indicateurs environnementaux évalués, il faudrait qu'il obtienne un rendement supérieur à 700 kWh/m<sup>2</sup>.an (en considérant un écart suffisant pour combler les incertitudes sur les modèles de caractérisation). Par contre, l'analyse montre que selon l'indicateur considéré, le système solaire peut devenir équivalent au chauffage électrique de référence plus tôt, soit (toujours en considérant les incertitudes) lorsque le rendement atteint 525 kWh/m<sup>2</sup>.an pour l'indicateur *Ressources*; 575 kWh/m<sup>2</sup>.an pour l'indicateur *Changement climatique* et; 550 kWh/m<sup>2</sup>.an pour les indicateurs *Santé humaine* et *Acidification aquatique*.

Malgré cela, le classement des technologies de production décentralisées de 1 MJ d'énergie thermique et celui des scénarios de production d'énergie thermique aptes à combler la demande d'une résidence québécoise moyenne restent globalement inchangés.

#### **3.5.5 Surface de collecteurs installée pour les systèmes solaires thermiques à circulation de fluide**

*Rappel : La configuration initiale du système à collecteurs plats consiste en une surface de captage de 6 m<sup>2</sup>, alors que celle du système à collecteurs à tubes sous vide compte 10,5 m<sup>2</sup>. L'effet de configurations alternatives pour une surface de captage variant respectivement entre 4 et 10 m<sup>2</sup> et entre 10 et 20 m<sup>2</sup> ont donc été testées.*

Pour les deux types de systèmes, le fait d'augmenter la surface de collecteurs installés a pour effet de réduire ses impacts potentiels par MJ produit selon tous les indicateurs, mais pas suffisamment pour se démarquer par rapport aux systèmes géothermiques ou au système solaire thermique à collecteurs à air vitrés.



Pour que l'énergie thermique produite par ces types de systèmes solaires soit préférable à celle du système de chauffage de référence alimenté par le réseau d'Hydro-Québec selon tous les indicateurs environnementaux à l'exception de *Eutrophisation aquatique*, il faudrait que la surface de capteurs installée soit supérieure aux plages testées (soit 10 m<sup>2</sup> dans le cas des collecteurs plats, et à 20 m<sup>2</sup> dans le cas des collecteurs à tubes sous vide), ce qui représente un défi compte tenu des enjeux liés aux plans technique et économique présentés par l'installation d'une telle surface de captage. Pour certains indicateurs, l'analyse montre que les systèmes solaires thermiques à collecteurs plats peuvent devenir équivalent au chauffage électrique de référence plus tôt, soit (en considérant les incertitudes) avec des surfaces de 5 m<sup>2</sup> pour l'indicateur *Ressources*, 8 m<sup>2</sup> pour *Changement climatique* et 7 m<sup>2</sup> pour *Santé humaine* et *Acidification aquatique*. Dans le cas des collecteurs à tube sous vide, ce sont des surfaces de 10 m<sup>2</sup> pour l'indicateur *Ressources* et environ 15 m<sup>2</sup> pour les indicateurs *Changement climatique*, *Santé humaine* et *Acidification aquatique* qui rendent ses performances similaires au chauffage électrique.

En ce qui a trait aux scénarios permettant de répondre à la demande énergétique d'une résidence moyenne, le classement des options évaluées reste inchangé sur toute la plage de valeurs testée, et la sensibilité des résultats globaux au paramètre « surface de captage » des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide est jugée faible. Notons cependant que plus ce type de système solaire répond à une part importante de la demande thermique résidentielle et plus l'indicateur *Eutrophisation aquatique* du scénario augmente, car la surface de capteurs est proportionnelle à l'utilisation de liquide caloporteur dont le traitement en fin de vie est le principal contributeur à cette catégorie d'impact.

### 3.5.6 Durée de vie des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide

*Rappel : Dans l'analyse initiale, une durée de vie de 25 ans a été utilisée pour la modélisation des systèmes thermosolaires à collecteurs plats et à tubes sous vide. Comme pour le rendement, une incertitude difficilement réductible prévaut quant à la durée de vie de certaines des composantes de ces systèmes. En particulier, la durée de vie des capteurs semble ne pas faire consensus parmi les différents acteurs du secteur. La sensibilité des résultats à une série de variations plausibles de la durée de vie des capteurs a donc été examinée. L'analyse a été effectuée pour le **système à collecteurs plats**, avec des durées de vie variant entre 25 et 45 ans. Le système à tubes sous vide suit généralement les mêmes tendances et n'a donc pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique.*

Toute augmentation de la durée de vie du système solaire thermique à collecteurs plats réduit ses impacts environnementaux potentiels. Pour que l'énergie thermique produite par ce type de système solaire soit préférable à celle du système de chauffage de référence alimenté par le réseau d'Hydro-Québec selon tous les indicateurs environnementaux évalués, il faudrait que sa durée de vie soit supérieure à 45 ans. Pour certains indicateurs, l'analyse montre que le système solaire peut devenir équivalent au chauffage électrique de référence plus tôt, soit (en considérant les incertitudes) pour une durée inférieure à 25 ans pour l'indicateur *Ressources* et 30 ans pour les indicateurs *Changement climatique*, *Santé humaine* et *Acidification aquatique*. Pour *Eutrophisation aquatique*, la durée de vie du système devrait être supérieure à 45 ans pour représenter un bénéfice par rapport au système de référence.

L'augmentation de la durée de vie des systèmes solaires à collecteurs plats rapproche leurs performances de celles des systèmes géothermiques.

Ainsi, du point de vue du MJ produit, l'augmentation de la durée de vie du système solaire thermique à collecteurs plats peut permettre d'améliorer ses performances, mais pas suffisamment pour qu'il devienne clairement avantageux par rapport au chauffage électrique selon tous les indicateurs. Par extension, il est raisonnable de considérer qu'il en est de même pour le système à tubes sous vide.

Du point de vue de l'analyse des scénarios permettant de répondre à la demande énergétique d'une résidence moyenne, le classement des options évaluées reste inchangé sur toute la plage de valeurs testée, et la sensibilité des résultats globaux au paramètre « durée de vie » des systèmes solaires à circulation de fluide est jugée faible.

### **3.5.7 Durée de vie du système solaire thermique à collecteurs à air**

*Rappel : Dans l'analyse initiale, une durée de vie de 37,5 ans a été utilisée pour la modélisation du système. Une incertitude difficilement réductible prévaut toutefois quant à la durée de vie, la seule référence ayant été le fabricant du système. Aucun consensus n'est ressorti quant à la durée de vie de ce type de capteur entre les experts consultés. La sensibilité des résultats à la durée de vie des capteurs a donc été examinée sur une plage variant entre 20 et 40 ans.*

Sur la base du MJ produit, les capteurs solaires à collecteurs à air vitrés sont avantageux par rapport au chauffage électrique de référence selon les indicateurs *Santé humaine*, *Changement climatique* et *Ressources*, avec des durées de vie bien inférieures à 20 ans. Pour les catégories d'impact *Acidification aquatique* et *Eutrophisation aquatique*, des durées de vie plus longues, de 30 et 37,5 ans respectivement, sont nécessaires pour qu'il soit possible de conclure fermement en leur faveur, compte tenu des incertitudes liées aux modèles de caractérisation.

La réduction de la durée de vie de ce type de capteurs solaires diminue cependant son avantage sur les systèmes géothermiques ; ainsi, avec une durée de vie de 20 ans, ses performances par MJ deviennent équivalentes ou moindres à ceux-ci.

En ce qui a trait aux scénarios permettant de répondre à la demande énergétique d'une résidence moyenne, comme c'était le cas pour les systèmes solaires à circulation de fluide, le classement des options évaluées reste donc inchangé sur toute la plage testée, et la sensibilité des résultats globaux au paramètre « durée de vie » du système solaire thermique à collecteurs à air vitrés est jugée faible.

### **3.5.8 Capacité du système solaire thermique à collecteurs à air (nombre de capteurs installés)**

*Rappel : Bien que la documentation du concepteur et fabricant des capteurs ESOLAIR 2.0 soit claire à l'effet qu'un ou deux capteurs constituent la plupart des systèmes de ce type actuellement en service au Québec, il demeure envisageable qu'une résidence soit dotée d'une capacité de production supérieure par l'ajout de capteurs chauffe-air. L'effet d'une configuration alternative comprenant l'installation simulée d'un nombre de capteurs variant entre 2 et 16 a donc été testé. Malgré le fait que l'installation d'une grande surface de captage présente des enjeux sur les plans technique et économique, il a semblé intéressant de faire ressortir le seuil au-delà duquel les tendances sont modifiées.*

Tel qu'attendu, du point de vue du MJ produit, l'augmentation de la capacité du système solaire à collecteurs à air par l'ajout de capteurs additionnels tend à augmenter la performance environnementale du système dans toutes les catégories d'indicateurs. Puisque ce dernier présente la meilleure performance comme mesure d'efficacité énergétique, l'augmentation de

sa capacité a pour effet de renforcer l'avantage déjà présent et n'affecte pas le classement des technologies les unes par rapport aux autres.

Du point de vue des scénarios de production d'énergie thermique pour répondre à la demande d'une résidence moyenne, l'augmentation du nombre de collecteurs à air a le potentiel d'améliorer de manière significative la performance environnementale du système dans les catégories d'indicateurs. La performance du scénario avec un système solaire à collecteurs à air devient équivalente à celle des scénarios à base de géothermie lorsqu'environ 12 capteurs solaires sont installés; en outre, le solaire présente alors un bénéfice selon les indicateurs *Changement climatique* et *Eutrophisation aquatique*. Un tel nombre de capteurs nécessite cependant près de 30 m<sup>2</sup> de surface de mur ou de toit, mais permet de générer en moyenne 18 000 kWh/année. Toute augmentation de la capacité installée supérieure à ce seuil rendrait ainsi la performance environnementale de ce système comparable ou supérieure à celles des scénarios à base de géothermie selon toutes les catégories d'indicateurs.

### 3.6 Résumé des analyses

Cette section présente une comparaison des scénarios incluant les systèmes géothermiques et solaires étudiés par rapport au système de chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec. L'ensemble des analyses effectuées y est intégré.

Le Tableau 3-3 a été conçu pour résumer toutes les analyses à l'aide d'un code de couleurs. Voici comment l'interpréter :

	L'analyse de base favorise le système de production décentralisée
	L'analyse de base favorise le système de chauffage électrique de référence
	L'analyse de base ne permet pas de conclure (système décentralisé <u>équivalent</u> au système de chauffage électrique de référence.

**Tableau 3-3 : Résumé des tendances observées, par rapport au chauffage électrique de référence, sur la base d'un MJ d'énergie thermique**

Indicateur (IMPACT 2002+)	Géothermique liquide-eau	Géothermique liquide-air	Thermosolaire à collecteurs plats	Thermosolaire à tubes sous vide	Thermosolaire à collecteurs à air
Santé humaine	1a		2 – 3a	2 – 5a	
Changement climatique	1a		2 – 3b	2 – 5b	
Ressources	1b		2 – 4	2 – 4	
Acidification aquatique	1c		2 – 3c	2 – 5a	8a
Eutrophisation aquatique			2	2	8b

**Nuances apportées par les analyses de sensibilité** (en tenant compte des incertitudes des modèles) :

- Le système géothermique liquide-eau devient équivalent au chauffage électrique de référence (base COP = 3,9) :
  - selon *Santé humaine* et *Changement climatique* quand son COP < 2 ;
  - selon *Ressources* quand son COP < 1,5.
  - selon *Acidification aquatique* quand son COP < 2,5 ;
- Le système décentralisé est favorisé si on considère un mélange d'approvisionnement électrique moyen d'Amérique du Nord pour l'étape d'utilisation.
- Le système solaire à collecteurs plats devient équivalent au chauffage électrique de référence (base : 539 kWh/m<sup>2</sup> ; 6 m<sup>2</sup> ; 25 ans) :
  - selon *Santé humaine* quand son rendement >550kWh/m<sup>2</sup> ; sa surface > 7 m<sup>2</sup> ou sa durée de vie > 30 ans ;
  - selon *Changement climatique* quand son rendement >575 kWh/m<sup>2</sup> ; sa surface >8 m<sup>2</sup> ou sa durée de vie >30 ans ;
  - selon *Acidification aquatique* quand son rendement >550 kWh/m<sup>2</sup> ; sa surface >7 m<sup>2</sup> ou durée de vie >30 ans ;
- Le chauffage de référence est préférable au système décentralisé selon la méthode ÉICV ReCiPe.
- Le système solaire à collecteur à tubes sous vide devient équivalent au chauffage électrique de référence (base : 10,5 m<sup>2</sup>)
  - selon *Santé humaine* et *Acidification aquatique* quand sa surface > 14 m<sup>2</sup> ;
  - selon *Changement climatique* quand sa surface >16 m<sup>2</sup> ;
- Le système décentralisé est préférable au système de référence selon la méthode EICV ReCiPe.
- Le système de chauffage électrique de référence devient équivalent au système solaire à collecteur à air (base : 37,5 ans)
  - selon *Acidification aquatique* quand sa durée de vie < 30 ans ;
  - selon *Eutrophisation aquatique* quand sa durée de vie < 37,5 ans.

Sur la base d'un MJ d'énergie thermique produite, les deux systèmes géothermiques et le système solaire thermique à collecteurs à air s'avèrent tous les trois préférables au chauffage électrique alimenté par le réseau d'Hydro-Québec. À la limite, ces systèmes décentralisés pourraient être équivalents au système de référence (valeurs présentées au tableau ci-haut), mais une inversion de cette conclusion semble peu probable.

Dans un contexte d'utilisation résidentielle exigeant la production d'une quantité d'énergie thermique correspondant à la demande annuelle, il en est autrement (Tableau 3-4). Dans ce tableau, les pourcentages (%) indiquent la probabilité d'inversion de la tendance<sup>9</sup>, selon l'analyse Monte-Carlo (tel que décrite à la sous-section 2.8.5). Lorsqu'aucun pourcentage n'est

<sup>9</sup> c.-à-d. que le système de chauffage de référence présente moins d'impacts potentiels que le système de production décentralisé.

indiqué entre parenthèses, c'est que la probabilité d'inversion est nulle. Ainsi, l'analyse Monte-Carlo confirme les résultats obtenus en indiquant de faibles probabilités d'inversion.

**Tableau 3-4 : Résumé des tendances observées, par rapport au chauffage électrique de référence, pour répondre à la demande annuelle d'une résidence**

Indicateur (IMPACT 2002+)	Géothermique liquide-eau	Géothermique liquide-air	Thermosolaire à collecteurs plats	Thermosolaire à tubes sous vide	Thermosolaire à collecteurs à air
Santé humaine	(<1%) <sup>1a</sup>	(<1%)			
Changement climatique	(7%) <sup>1b</sup>	(5%)	2	2	2
Ressources	(<1%) <sup>1c</sup>		2	2	2
Acidification aquatique	(<1%) <sup>1d</sup>	(<1%)			
Eutrophisation aquatique					

**Nuances apportées par les analyses de sensibilité** (en tenant compte des incertitudes des modèles) :

- Le système géothermique devient équivalent au chauffage électrique de référence (base COP = 3,9) :
  - selon *Santé humaine* quand son COP < 2,5
  - selon *Changement climatique* quand son COP < 2 ;
  - selon *Ressources* quand son COP < 1,5.
  - selon *Acidification aquatique* quand son COP < 3 ;
- Le système décentralisé est favorisé si on considère un mélange d'approvisionnement électrique moyen d'Amérique du Nord pour l'étape d'utilisation.

Bien qu'il ne soit pas possible de trancher selon l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, celui-ci identifie les poteaux de bois traité du réseau de distribution d'Hydro-Québec comme étant une source d'impacts potentiellement importante. Dans le contexte d'une prise de décision par un propriétaire résidentiel, cette information est d'assez peu de valeur, puisque le choix individuel (même s'il était étendu à toute la société) de se chauffer par un système de production décentralisée d'énergie thermique ne risque pas d'engendrer des modifications au réseau de distribution d'électricité, étant donné la consommation électrique autre qu'à des fins de chauffage. Cependant, il pourra être intéressant pour Hydro-Québec de pousser les recherches afin de mieux comprendre les impacts potentiellement générés par son réseau de distribution.

### 3.7 Applications et limites de l'ACV

Cette ACV vise à établir le profil environnemental de cycle de vie de différentes technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle, et à les comparer dans un contexte québécois. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Ses résultats pourront être utilisés pour :

- Caractériser le profil environnemental des différents systèmes étudiés, en identifier et en comparer les « points chauds » et les paramètres clés ;
- Cibler les forces et les faiblesses de chacune des alternatives et identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à l'autre.

Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernant :

- Le nombre et la validité des hypothèses relatives au cycle de vie des technologies et scénarios étudiés ;
- La complétude et la validité des données d'inventaire. En particulier :
  - il s'avère difficile de conclure quant à la complétude de la donnée construite pour modéliser les impacts du système solaire thermique à collecteurs à air vitrés : bien que toute l'information disponible ait été rendue disponible par MC<sup>2</sup> Énergie, il est possible que l'existence de certains processus soit restée inconnue.
  - le processus de traitement du fluide caloporteur employé dans les systèmes solaires à circulation de fluide a été modélisé à partir d'une donnée générique européenne peu représentative des usines de traitement d'eau usée québécoises. L'importante contribution de ces systèmes à l'indicateur *Eutrophisation aquatique* doit donc être considérée avec prudence vu l'incertitude reliée à la modélisation.
- La complétude et la validité de la méthode d'évaluation des impacts utilisée, entre autres parce qu'elle ne couvre pas toutes les substances inventoriées, ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines. Notamment :
  - Les catégories d'impact « cancer », « non-cancer » et « écotoxicité » ne sont pas des mesures du risque associé aux systèmes évalués. En effet, les différentes émissions sont agrégées dans le temps et l'espace afin de constituer un inventaire dans lequel un seul flux est associé à chacune des substances répertoriées (c.-à-d. la masse totale émise par l'ensemble des processus qui la produisent). Il n'est donc pas possible de connaître le lieu, ni le moment où ont lieu les émissions et donc, d'identifier la quantité à laquelle est exposée une région donnée, l'information sur laquelle repose l'appréciation du risque pour une population donnée.
  - Les modèles d'évaluation des émissions toxiques employées pour caractériser les métaux ont été « adaptés » de modèles développés pour la caractérisation des composés organiques. Ils ne tiennent pas compte de la spéciation des composés, fonction des conditions environnementales spécifiques du lieu d'émission (tous les métaux sont considérés comme 100 % biodisponibles). De ce fait, l'impact potentiel des métaux émis au sol est actuellement surestimé pour les catégories « écotoxicité terrestre/aquatique » et « toxicité humaine cancer/non cancer », ce qui se traduit par une surestimation de la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*.
  - L'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la base de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en unités d'indicateurs d'impact et de dommage. Or plusieurs flux élémentaires n'ont pu être convertis en scores d'impact puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible. Ils n'ont donc pas été considérés lors de la phase d'évaluation des impacts potentiels. C'est le cas notamment de l'impact de la création des réservoirs hydro-électriques et du turbinage de l'eau.
  - Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir

la meilleure estimation possible (Udo-de-Haes *et coll.*, 2002). En effet, l'évaluation des impacts du cycle de vie tente de représenter le cas le plus probable, c.-à-d. que les modèles utilisés, soit les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques, ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage environnemental (approche du pire scénario) mais bien d'en représenter un cas moyen.

Il convient enfin de rappeler que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

### 3.8 Recommandations et perspectives

#### 3.8.1 *Recommandations pour améliorer la production d'énergie thermique décentralisée*

À la lumière des résultats obtenus dans la présente analyse, deux alternatives ressortent comme étant plus performantes d'un point de vue environnemental :

- **Par MJ produit :** le système solaire à collecteurs à air se démarque dans toutes les catégories d'indicateurs;
- **Par scénario de production d'énergie pour répondre à la demande d'une résidence québécoise moyenne :** les systèmes géothermiques deviennent globalement préférables dès lors que la demande énergétique dépasse celle des deux premiers mois de l'année d'une résidence québécoise moyenne.

#### Recommandations relatives au système solaire à collecteurs à air vitré

Il a été vu que l'augmentation du nombre de capteurs peut théoriquement permettre de fournir suffisamment d'énergie thermique à une résidence québécoise moyenne pour que ce type de système représente une solution intéressante et même plus performante que les systèmes géothermiques.

L'installation de tels panneaux présente par contre des limitations techniques et économiques. En effet, un panneau a une surface moyenne de 2,6 m<sup>2</sup>. À la lumière de l'analyse de sensibilité présentée à la sous-section 3.5.7, il semble peu envisageable que puissent être installés autant de panneaux que nécessaires sur une maison moyenne en ville. De même, le coût d'achat du système pourra s'avérer prohibitif pour un propriétaire intéressé par la production décentralisée d'énergie thermique. En conséquence, il serait pertinent d'intégrer une analyse de faisabilité économique et technique à l'étude environnementale, afin d'élargir les perspectives et de conclure de manière plus globale sur l'intérêt d'une technologie de production décentralisée.

#### Recommandations relatives aux systèmes géothermiques

Pour les deux systèmes évalués, l'efficacité de la pompe à chaleur (ou le COP) et la qualité du dimensionnement ressortent comme des paramètres déterminants de la performance. Or, en ce qui concerne l'industrie géothermique au Québec, une majorité de concepteurs/installateurs résidentiels tendraient à surdimensionner la thermopompe, ce qui engendrerait une boucle souterraine trop longue, une surcapacité dormante et des surcoûts pour l'acheteur (Rotondo, 2009).

Cette dernière tendance, si elle s'avère effectivement généralisée, contribue sans doute à discréditer l'alternative auprès de certains ménages qui, autrement, s'y seraient intéressés, ou encore à la rendre financièrement inaccessible. Ainsi, à la lumière d'un bilan environnemental plutôt favorable à la géothermique, la tendance au surdimensionnement des systèmes résidentiels mériterait d'être investiguée. Du point de vue environnemental, un dimensionnement optimal et adéquat des systèmes géothermiques résidentiels pourrait engendrer des gains en matière de : 1) performance énergétique et économique à la résidence, 2) consommation et émissions lors des transports et 3) réduction des quantités de matériaux, et donc d'énergie de production consommée en amont de l'étape d'exploitation, le long de la chaîne de valeur.

### **3.8.2 Perspectives**

Les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique permettent tous d'éviter la consommation d'électricité provenant du réseau d'Hydro-Québec. Dans les faits, l'énergie ainsi libérée serait fort probablement exportée vers l'Ontario ou les États-Unis, où elles se substitueraient à une énergie issue du réseau nord-américain. Ce faisant, il en découlerait des bénéfices environnementaux potentiels, du fait de la plus forte dépendance du réseau nord-américain aux énergies fossiles (Ben Amor *et coll.*, 2010). En continuité avec le travail effectué dans le cadre de la présente étude, il serait à la fois pertinent et intéressant de quantifier les bénéfices potentiellement encourus par l'exportation (en Ontario et aux États-Unis) de quantités d'énergie non consommées au Québec grâce aux mesures d'efficacité énergétique étudiées. Pour ce faire, une approche de modélisation conséquentielle du cycle de vie s'avérerait appropriée. Les travaux de doctorats réalisés à la Chaire internationale sur le cycle de vie par Mourad Ben Amor (Ben Amor *et coll.*, 2010) aideraient à la définition d'un cadre méthodologique bien adapté à la problématique et au contexte nord-américain.

Par ailleurs, la présente étude a été balisée en fonction des particularités d'un contexte énergétique résidentiel, représentatif de conditions de logement moyennes au Québec. La sélection des technologies étudiées et le dimensionnement des systèmes ont donc été faits en fonction des caractéristiques d'une telle demande en énergie thermique. D'autres contextes d'utilisation ou d'autres types de demandes énergétiques présentent également un intérêt : en particulier, les bâtiments résidentiels de type condominium, les nouveaux développements ou les bâtiments commerciaux. De par la plus grande échelle qu'ils représentent et par le caractère partagé de certaines des infrastructures sur lesquels ils s'appuient, ces types de consommateurs présentent une compatibilité avec les conditions de viabilité économique et environnementale de la production d'énergie décentralisée. En continuité avec le présent projet, il pourrait s'avérer intéressant d'élargir le champ de l'analyse afin d'inclure un éventail plus large de contextes d'utilisation (ou de types de demandes énergétiques).



## 4 Conclusions

---

Cette étude a permis de répondre aux deux objectifs établis au départ, à savoir :

- Établir le profil environnemental de cycle de vie de différents systèmes génériques de production décentralisée d'énergie thermique;
- Comparer les systèmes de production décentralisée d'énergie à l'étude entre eux et avec le système de référence (réseau provincial d'Hydro-Québec).

En tout, cinq technologies de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ont été retenues et comparées à l'énergie du réseau d'Hydro-Québec :

- Systèmes géothermiques
  1. Pompe à chaleur liquide-air monobloc
  2. Pompe à chaleur liquide-eau (ou hydronique)
- Systèmes solaires thermiques
  3. Système thermosolaire à collecteurs plats
  4. Système thermosolaire à tubes sous vide
  5. Système thermosolaire à collecteurs à air vitrés

De manière générale, les deux systèmes géothermiques se présentent comme des options intéressantes sur le plan environnemental. Les scénarios de production d'énergie construits sur leur base combinent une capacité intéressante à :

- 1) engendrer des gains environnementaux (pour chaque MJ produit) et
- 2) combler la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne.

Ainsi, pour cinq des six indicateurs environnementaux considérés (exception faite du potentiel d'*Eutrophisation aquatique*), la production d'énergie à partir des **technologies géothermiques** permettrait de réduire les impacts environnementaux par rapport au réseau et s'avèrerait plus avantageuse que les trois scénarios à base des technologies solaires thermiques. En dépit d'une consommation d'énergie à l'étape d'utilisation et du caractère relativement imposant de leur infrastructure (par rapport aux systèmes solaires), les systèmes géothermiques parviennent à se démarquer en raison de leur durée de vie prolongée et du fait que le Québec jouit d'un mélange d'approvisionnement énergétique en grande partie issu de centrales hydroélectriques. Également, lorsque la fonction de climatisation est prise en considération, le **système géothermique liquide-air** est généralement favorisé par rapport aux autres scénarios puisqu'il est le seul à permettre le refroidissement de l'air sans aucun changement à son installation. La géothermie liquide-eau reste également une option à favoriser, même en y ajoutant des climatiseurs muraux pour répondre aux besoins de climatisation.

Le **système solaire thermique à collecteurs à air** présente quant à lui la meilleure performance environnementale potentielle par MJ d'énergie produite. En revanche, la faible capacité qui caractérise de tels systèmes (du fait du petit nombre de capteurs typiquement installés) ne lui permet de combler qu'une faible part de la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne. Ceci fait en sorte que la performance du scénario de production d'énergie à base du système solaire à collecteurs air ne parvient que très marginalement à se démarquer de celle du réseau.

Enfin, les **systèmes solaires thermiques à circulation de fluides** (à collecteurs plats et à tubes sous vide) présentent une performance environnementale potentielle plus mitigée. Selon les

indicateurs considérés, les scénarios de production d'énergie avec ces technologies engendreraient plus d'impacts environnementaux ou seraient équivalents à l'énergie du réseau.

Il ressort de cette étude que le principal paramètre influençant la performance environnementale d'un scénario de production d'énergie thermique se lie à la capacité de la technologie de production d'énergie décentralisée sur laquelle il s'appuie à combler une part significative de la demande d'une résidence québécoise moyenne.

Pour chaque MJ produit (c.-à-d. sans égard à la capacité d'une technologie à combler une proportion significative de la demande), il ressort par ailleurs que les paramètres influençant la performance environnementale sont 1) la capacité d'une technologie à réduire la consommation d'énergie issue du réseau et 2) sa capacité à en dégager des bénéfices environnementaux nets par rapport au réseau dans toutes les catégories d'indicateurs.

## 5 Références

---

- AGENCE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (Internet). Comparer vos coûts d'énergie. En ligne : [http://coutsenergie.aee.gouv.qc.ca/comp\\_couts.asp](http://coutsenergie.aee.gouv.qc.ca/comp_couts.asp) [Page consultée le 15 mai 2011].
- BEN AMOR M., LESAGE, P., PINEAU, P.-O. et SAMSON, R. (2010). Can distributed generation offer substantial benefits in a Northeastern American context? A case study of small-scale renewable technologies using a life cycle methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, pp. 2885-2895.
- CANMET (2002). Systèmes géothermiques commerciaux : guide de l'acheteur, Fig. 14, p. 20. Centre de la technologie de l'énergie de CANMET.
- CANMET ÉNERGIE (2010). Étude de l'industrie et du marché des capteurs thermosolaires actifs au Canada (2009), réalisée par SAIC Canada à la demande de Ressources naturelles Canada, 36 pages. En ligne : <http://canmetenergie.rncan.gc.ca/energies-renouvelables/solaire-thermique/publications/3006> [Page consultée le 17 juillet 2012].
- COALITION CANADIENNE DE L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE (Internet). En ligne : [http://www.geo-exchange.ca/fr/geothermie\\_p10.php](http://www.geo-exchange.ca/fr/geothermie_p10.php) [Page consultée le 11 septembre 2012].
- DAYCREEK.COM (Internet). En ligne : [www.daycreek.com/dc/html/DC\\_solar.htm/](http://www.daycreek.com/dc/html/DC_solar.htm/) [Page consultée le 29 novembre 2011].
- DESROCHERS, L. (2012). Le climatiseur mural. Article en ligne : <http://www.climatisation-chauffage-laval.com/questions%20sur%20les%20mini-split.html> [Page consultée le 2 avril 2013].
- DJEBBAR, R. (2009). Life Cycle Analysis of Solar thermal water/air heating systems (CIRAIG), entre le 11 septembre et le 1 octobre 2009. Échanges courriel entre Reda Djebbar, Analyste en Énergie Solaire à Canmet ÉNERGIE (Ressources naturelles Canada) et Marie-Luc Arpin, analyste au CIRAIG.
- FAVREAU, E. (2010). Validation du modèle d'ACV pour le capteur ESOLAIR 2.0, le 20 octobre 2010. Rencontre entre Éric Favreau, ing., président de MC<sup>2</sup> Énergie, et Marie-Luc Arpin, analyste au CIRAIG. Plusieurs échanges téléphoniques et courriels ont également eu lieu entre juin 2009 et décembre 2011.
- FONTAINE, J. (2013). Fluides caloporteurs des boucles souterraines en circuit fermé. 19 avril 2013. Entretien téléphonique entre Jacques Fontaine, Président-fondateur de Géothermie Boréale, et Geneviève Martineau, analyste du CIRAIG.
- GÉOTHERMIE BORÉALE (2009). Manuel d'installation : Modèles HW25-45-55-65-75 (HW series), En ligne : [www.geothermie-boreale.ca/images/stories/PDF/nouveaux\\_manuels\\_2011/serie-w\\_boreale\\_francais\\_2011\\_3.pdf](http://www.geothermie-boreale.ca/images/stories/PDF/nouveaux_manuels_2011/serie-w_boreale_francais_2011_3.pdf) [Document téléchargé le 11 août 2011].
- GÉOTHERMIE BORÉALE (2011). Manuel de service et d'installation : R/RH Series (AC) Eau-Air, En ligne : [www.geothermie-boreale.ca/images/stories/PDF/nouveaux\\_manuels\\_2011/serie-r\\_boreale\\_francais\\_2011\\_v2.pdf](http://www.geothermie-boreale.ca/images/stories/PDF/nouveaux_manuels_2011/serie-r_boreale_francais_2011_v2.pdf) [Document téléchargé le 11 août 2011].
- GÉOTHERMIE BORÉALE (Internet). Site internet de l'entreprise. En ligne : [www.geothermie-boreale.ca/](http://www.geothermie-boreale.ca/) [Page consultée le 24 novembre 2011].
- GOEDKOOP, M.J., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J. et VAN ZELM, R. (2009). ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009, 126 p. En ligne : [www.lcia-recipe.net](http://www.lcia-recipe.net).

- GRIGNON-MASSE, L. (2010). Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés aux confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine. Doctorat ParisTech, Thèse de l'École nationale supérieure des mines de Paris, 325 pages. En ligne : [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These\\_grignon\\_masse.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These_grignon_masse.pdf) [Page consultée le 25 septembre 2012].
- HAESELTONCKX, D. et D'HAESELEER, W. (2008). The environmental impact of decentralised generation in an overall system context, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 437-454
- HECK, T. (2007). ecoinvent report Nr. 06-X: Teil X Wärmepumpen, Paul Scherrer Institut, Villigen. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. 34 p.
- HELIOFRANCE (Internet). Site internet de l'entreprise. En ligne : [www.solaire-panneau-thermique.com/panneaux-solaires/panneau-solaire-thermique-plan-heliofrance-monobloc-cadre-aluminium-brut-2-75m-hors-tout/p780f2/detail.php/](http://www.solaire-panneau-thermique.com/panneaux-solaires/panneau-solaire-thermique-plan-heliofrance-monobloc-cadre-aluminium-brut-2-75m-hors-tout/p780f2/detail.php/) [Page consultée le 29 novembre 2011].
- HUMBERT, S., ROSSI, V., MARGNI, M., JOLLIET, O. et LOERINCIK, Y. (2009). Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(2) p.95-106.
- HYDRO-QUÉBEC (2009). Plan d'action de développement durable 2009-2013 : le développement durable une culture d'entreprise, 16 p.
- HYDRO-QUÉBEC (2011). Faits sur l'électricité d'Hydro-Québec : Approvisionnements énergétiques et émissions atmosphériques, 2011. En ligne : [http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/themes/docs/etiquette\\_francais\\_2011.pdf](http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/themes/docs/etiquette_francais_2011.pdf) [Page consultée le 28 février 2013].
- IPCC (2007): Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland (2007). "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing". In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*" [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. En ligne : [www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf) [Page consultée le 24 novembre 2011].
- ISO (2006a). ISO 14040: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO (2006b). ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, Organisation internationale de normalisation, 56 p.
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G. et ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8(6) p.324-330.
- JUNGBLUTH, N. (2007). Dans Dones, R. (Ed.) *et coll.*, *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. ecoinvent report No. 6-XI: Sonnenkollektor-Anlagen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, 42 p.
- LAMBERT, P. (2013). Entretien des systèmes géothermiques, 12 avril 2013. Entretien téléphonique entre Patrick Lambert, concepteur de systèmes géothermiques, Géo-Energie Inc., et Marie-Luc Arpin, analyste du CIRAIG.

- MARCOTTE, D. (2009). La géothermie résidentielle au Québec, 27 mars 2009. Rencontre entre Denis Marcotte, professeur titulaire au département de génie civil, géologique et des mines de l'École polytechnique de Montréal et Marie-Luc Arpin, analyste du CIRAIG.
- MASSÉ, S. (2013) Caractéristiques techniques des liquides caloporteurs pour les systèmes géothermiques en circuit fermé, 22 avril 2013. Entretien téléphonique entre Simon Massé, Groupe Puitbec inc., et Marie-Luc Arpin, analyste du CIRAIG.
- MC<sup>2</sup> ÉNERGIE (Internet). Site internet de l'entreprise. En ligne : [http://mc2energie.com/fr/chauffage\\_solaire.html](http://mc2energie.com/fr/chauffage_solaire.html) [Page consultée le 29 novembre 2011].
- MICHAUD, R. et BELLEY, C. (2008). Analyse du cycle de vie comparative d'ampoules électriques : incandescentes et fluocompactes, Rapport final d'une étude réalisée par le CIRAIG pour Hydro-Québec, avril 2008, 57 p., 5 annexes. En ligne : [www.ciraig.org/pdf/ACV\\_Ampoules\\_Rapp\\_Final.pdf](http://www.ciraig.org/pdf/ACV_Ampoules_Rapp_Final.pdf) [Page consultée le 15 décembre 2011].
- OFFICE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (Internet). Tableau de la Base de données complétée sur la consommation d'énergie, Secteur résidentiel, Québec. Tableau 4 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES pour la climatisation par type de climatiseur. En ligne : [http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableauxevolution2/res\\_qc\\_4\\_f\\_4.cfm?attr=0](http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableauxevolution2/res_qc_4_f_4.cfm?attr=0) [Page consultée le 25 septembre 2012].
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (Internet) Suite logicielle RETScreen. MRETSscreen (version 4). Natural Resources Canada et NRCAN/CTEC. En ligne : <http://www.retscreen.net/fr/home.php> [Page consultée le 12 septembre 2012].
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2011). Climatiseurs individuels. En ligne : <http://oee.nrcan.gc.ca/node/15086> [Page consultée le 2 avril 2013].
- ROTONDO, A. (2009). La géothermie résidentielle au Québec, 24 mars 2009. Entretien téléphonique entre André Rotondo, Géo-Énergie Inc. et Marie-Luc Arpin, analyste du CIRAIG.
- SAIC CANADA (2009). Survey of Active Solar Thermal Collectors, Industry and Markets in Canada (2008), étude réalisée par Canmet ÉNERGIE pour Ressources naturelles Canada, Ville, 22 pages En ligne : <http://canmetenergy.nrcan.gc.ca/renewables/solar-thermal/publications/788> [Page consultée le 19 mai 2011].
- SAIC CANADA (2010). Survey of Active Solar Thermal Collectors, Industry and Markets in Canada (2009), étude réalisée par Canmet ÉNERGIE pour Ressources naturelles Canada, Ville, 22 pages En ligne : [www.cansia.ca/sites/default/files/2010\\_nrcan\\_canadian\\_st\\_market.pdf](http://www.cansia.ca/sites/default/files/2010_nrcan_canadian_st_market.pdf) [Page consultée le 19 mai 2011].
- SOLAR PANELS PLUS (Internet). Site internet de l'entreprise. En ligne : [www.solarpanelsplus.com](http://www.solarpanelsplus.com) [Page consultée le 14 décembre 2011].
- SOLARTECHNIK SPF (2002). Solar Collector Factsheet Soltop COBRA X, [http://www.solarenergy.ch/index.php?id=111&L=7&no\\_cache=1](http://www.solarenergy.ch/index.php?id=111&L=7&no_cache=1) [Document téléchargé le 11 août 2011].
- SOLARTECHNIK SPF (2003). Solar Collector Factsheet Thermomax mazdon 30 – TMA 600S, [http://www.solarenergy.ch/index.php?id=111&L=7&no\\_cache=1](http://www.solarenergy.ch/index.php?id=111&L=7&no_cache=1) [Document téléchargé le 11 août 2011].
- SOLARTHERM TECHNOLOGIES (Internet). Site internet de l'entreprise. En ligne : [www.solarthermtech.com/solarthermal.htm/](http://www.solarthermtech.com/solarthermal.htm/) [Page consultée le 29 novembre 2011].
- STATISTIQUES CANADA (2006). Recensement du Canada, 2006 (24 septembre 2009), tel que rapporté par l'Institut de la statistique du Québec dans « Logements privés occupés selon la période de construction, régions administratives, Québec, 2006. » En ligne :

- [www.stat.gouv.qc.ca/regions/lequebec\\_20/logements\\_20/logperio20.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/lequebec_20/logements_20/logperio20.htm) [Page consultée le 15 décembre 2011].
- TERMIUM PLUS (Internet). Travaux publics et services gouvernementaux Canada. «La banque de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada». En ligne : [www.btb.termiumplus.gc.ca/site/termium.php?lang=fra&cont=001](http://www.btb.termiumplus.gc.ca/site/termium.php?lang=fra&cont=001) [Page consultée le 30 novembre 2011]
- UDO-DE-HAES, H.A., FINNVEDEN, G. et GOEDKOOP, M. (2002). Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice, Society of Environmental Toxicology & Chemist, 272 p.
- UNITED NATIONS (1998). Report of the Conference of the Parties on its Third Session, held at Kyoto from 1 to 11 December 1997. Addendum Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties at its Third Session. Framework Convention on Climate Change, FCCC/CP/1997/7/Add.1, 25 March 1998, 60 pages.
- VEILLEUX, M. (2013) Caractéristiques techniques des liquides caloporteurs pour les systèmes géothermiques en circuit fermé, 22 avril 2013. Entretien téléphonique entre Martin Veilleux, chargé de projet chez Forages Technic-Eau,, et Marie-Luc Arpin, analyste du CIRAIG.
- WEISS, W., BERGMANN, I. et FANINGER, G. (2006). Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Supply 2004. International Energy Agency. 41 p.

## Annexe A : Méthodologie de l'Analyse du cycle de vie (ACV)

---

A.1	TERMES ET DÉFINITIONS .....	A-2
A.2	PHASE I DE L'ACV : DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE .....	A-4
A.3	PHASE II DE L'ACV : ANALYSE DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE .....	A-5
A.3.1	<i>Description des catégories de données</i> .....	A-6
A.3.2	<i>Recueil des données</i> .....	A-8
A.3.3	<i>Validation des données</i> .....	A-8
A.3.4	<i>Mise en rapport des données avec le processus élémentaire</i> .....	A-9
A.3.5	<i>Mise en rapport des données avec l'unité fonctionnelle</i> .....	A-9
A.4	PHASE III DE L'ACV : ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE .....	A-10
A.4.1	<i>Sélection des catégories d'impacts et des modèles de caractérisation</i> .....	A-11
A.4.2	<i>Classification et caractérisation des résultats d'inventaire</i> .....	A-13
A.4.3	<i>Éléments optionnels</i> .....	A-14
A.5	PHASE IV DE L'ACV : INTERPRÉTATION .....	A-15
A.6	RÉFÉRENCES .....	A-16

La méthodologie ACV est régie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), en particulier la série de normes ISO 14 040. Les sections suivantes présentent quelques termes et définitions, de même que les principaux aspects méthodologiques de chacune des quatre phases de l'ACV.

## A.1 Termes et définitions

**Analyse de sensibilité** : procédure systématique pour estimer les effets sur les résultats d'une étude des choix concernant les méthodes et les données.

**Analyse d'incertitude** : procédure systématique permettant de rechercher, puis de quantifier, l'incertitude introduite dans les résultats d'un inventaire du cycle de vie par les effets cumulés de l'imprécision du modèle, de l'incertitude sur les intrants et de la variabilité des données.

**Analyse du cycle de vie (ACV)** : compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie.

**Analyse du cycle de vie axée sur les attributs (ACV-A)** : analyse visant à attribuer à un système de produits la juste part des impacts dont il est responsable.

**Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences (ACV-C)** : analyse visant à évaluer les conséquences d'un système de produits (ou d'une décision affectant ce système) sur d'autres systèmes.

**Catégorie d'impact** : classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés.

**Contrôle de cohérence** : procédé, mis en œuvre avant d'arriver aux conclusions, permettant de vérifier que les hypothèses, les méthodes et les données sont appliquées de manière cohérente tout au long de l'étude, et conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

**Contrôle de complétude** : procédé permettant de vérifier si les informations des phases précédentes d'une analyse du cycle de vie suffisent pour arriver à des conclusions conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

**Contrôle de sensibilité** : procédé permettant de vérifier que les informations obtenues à partir d'une analyse de sensibilité sont pertinentes pour établir des conclusions et donner des recommandations.

**Émissions** : émissions dans l'air et rejets dans l'eau et le sol.

**Entrant** : voir « Intrant »

**Évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV)** : phase de l'analyse du cycle de vie destinée à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie.

**Extrant** : flux de produit, de matière ou d'énergie sortant d'un processus élémentaire (NOTE Les produits et les matières comprennent des matières premières, des produits intermédiaires, des coproduits et des émissions).

**Facteur de caractérisation** : facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie.

**Flux de produits** : produits entrant ou sortant d'un système de produits en direction d'un autre.



**Flux de référence** : mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle.

**Flux élémentaire** : matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure.

**Flux énergétique** : intrant ou extrant d'un processus élémentaire ou d'un système de produits, exprimé en unités d'énergie (NOTE Le flux énergétique entrant peut être appelé intrant, et le flux énergétique sortant, extrant).

**Flux intermédiaire** : flux de produit, de matière ou d'énergie intervenant entre des processus élémentaires du système de produits étudié.

**Frontière du système** : ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie d'un système de produits.

**Indicateur de catégorie d'impact** : représentation quantifiable d'une catégorie d'impact (NOTE L'expression condensée «indicateur de catégorie» est parfois utilisée).

**Interprétation du cycle de vie** : phase de l'analyse du cycle de vie au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire ou de l'évaluation de l'impact, ou des deux, sont évalués en relation avec les objectifs et le champ définis pour l'étude afin de dégager des conclusions et des recommandations.

**Intrant** : flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire (NOTE Les produits et les matières comprennent des matières premières, des produits intermédiaires et des coproduits).

**Inventaire du cycle de vie (ICV)** : phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie.

**Matière première** : matière première ou secondaire utilisée pour réaliser un produit.

**Processus élémentaire** : plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées.

**Processus** : ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des intrants en extrants

**Revue critique** : processus destiné à s'assurer de la cohérence entre une analyse du cycle de vie et les principes et exigences spécifiés par les Normes internationales traitant de l'analyse du cycle de vie.

**Sortant** : voir « Extrant »

**Système de produits** : ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une ou plusieurs fonctions définies, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit.

**Unité fonctionnelle** : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

**Vérification des résultats** : élément de la phase d'interprétation du cycle de vie permettant d'établir la confiance dans les résultats de l'étude de l'analyse du cycle de vie (NOTE La vérification comprend le contrôle de complétude, de sensibilité, de cohérence et toute autre validation pouvant être requise conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude).

## A.2 Phase I de l'ACV : Définition des objectifs et du champ de l'étude

La première phase de l'ACV, appelée définition des objectifs et du champ de l'étude, présente essentiellement la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cette fin (c.-à-d. le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV).

L'application envisagée et le public cible doivent d'abord être clairement définis puisqu'ils vont fixer la profondeur et l'ampleur de l'étude.

Selon l'ISO, les ACV s'effectuent en mettant au point des modèles qui décrivent les éléments clés des systèmes physiques. Le système de produits<sup>1</sup> représente les activités humaines considérées dans l'étude et l'évaluation des impacts est basée sur des modèles (mécanismes environnementaux) qui lient les interventions environnementales de ces activités et leurs effets potentiels sur l'environnement.

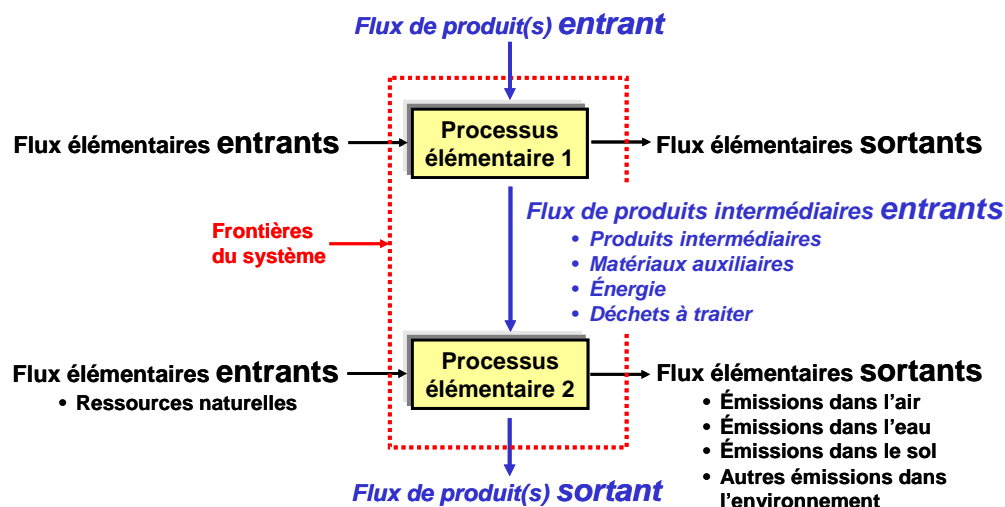
L'ISO définit un **système de produits** comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions. Dans ce sens, le sujet d'une ACV est caractérisé par ses fonctions et non seulement en termes de ses produits finaux. Ceci permet la comparaison de produits qui n'ont pas la même performance fonctionnelle par unité de produit (p. ex. une tasse de Styromousse à usage unique et une tasse en céramique qui est réutilisée plusieurs fois), puisque la quantification de la performance fonctionnelle, au moyen de l'**unité fonctionnelle**, fournit une référence à partir de laquelle sont mathématiquement normalisés les entrants et les sortants des systèmes comparés (p. ex. boire 2 tasses de café par jour durant un an). La spécification de l'unité fonctionnelle est le point de départ de la définition des frontières du système de produits puisqu'elle indique quels sont les processus élémentaires qui doivent être inclus pour remplir cette fonction. Plus la définition de l'unité fonctionnelle est précise, plus les frontières du système sont restrictives.

Un **processus élémentaire**, tel que défini par l'ISO, est la plus petite partie d'un système de produits pour laquelle sont recueillies des données (c.-à-d. il peut représenter un procédé chimique spécifique ou une usine complète incluant de nombreux sous-procédés). Un processus élémentaire est caractérisé par ses entrants et sortants, si le processus élémentaire représente plus d'un sous-procédé, leurs entrants et sortants sont alors agrégés ensemble.

Selon l'ISO, les processus élémentaires sont liés aux écosystèmes naturels (ou écosphère) par des **flux élémentaires** et aux systèmes économiques (ou technosphère, c.-à-d. la part de l'écosphère qui a été transformée par les activités humaines) par des **flux de produits** (Figure A-1). On distingue également les **flux de produits intermédiaires**, entre les processus du système de produits étudié. Ainsi, les flux élémentaires sont puisés directement de ou émis directement dans l'environnement et donc, contribuent aux catégories d'impacts, tandis que les flux de produits (matière, énergie ou service, incluant les coproduits, sous-produits et déchets) sont plutôt utilisés pour déterminer l'intensité des processus modélisés.

---

<sup>1</sup> Le terme « produits » utilisé seul peut comprendre non seulement des systèmes de produits mais aussi des systèmes de services.



**Figure A-1 : Frontières et processus élémentaires d'un système de produits.**

L'utilisation d'un diagramme de procédés illustrant les processus élémentaires et leurs interrelations (flux de matières et d'énergie) permet le suivi des frontières du système de produits.

Selon l'ISO, dans l'idéal il convient de modéliser le système de produits de telle sorte que les entrants et les sortants à ses frontières soient des flux élémentaires. Dans de nombreux cas, il n'y a cependant ni assez de temps, ni assez de données, ni assez de ressources pour effectuer une étude aussi complète. Des décisions doivent être prises concernant les processus élémentaires et les flux élémentaires<sup>2</sup> qui doivent être initialement inclus dans l'étude. L'ISO stipule également qu'il n'est pas nécessaire de quantifier des entrants et des sortants qui ne changeront pas de façon significative les conclusions globales de l'étude, elle suggère aussi des critères pour l'inclusion des flux (p. ex. contribution au-dessus d'un certain seuil aux bilans de masse ou d'énergie ou pertinence environnementale).

La liste de tous les processus élémentaires et flux élémentaires à modéliser peut être corrigée avec l'acquisition de nouvelles informations, les décisions menant à ce raffinement des frontières du système devant être clairement présentées.

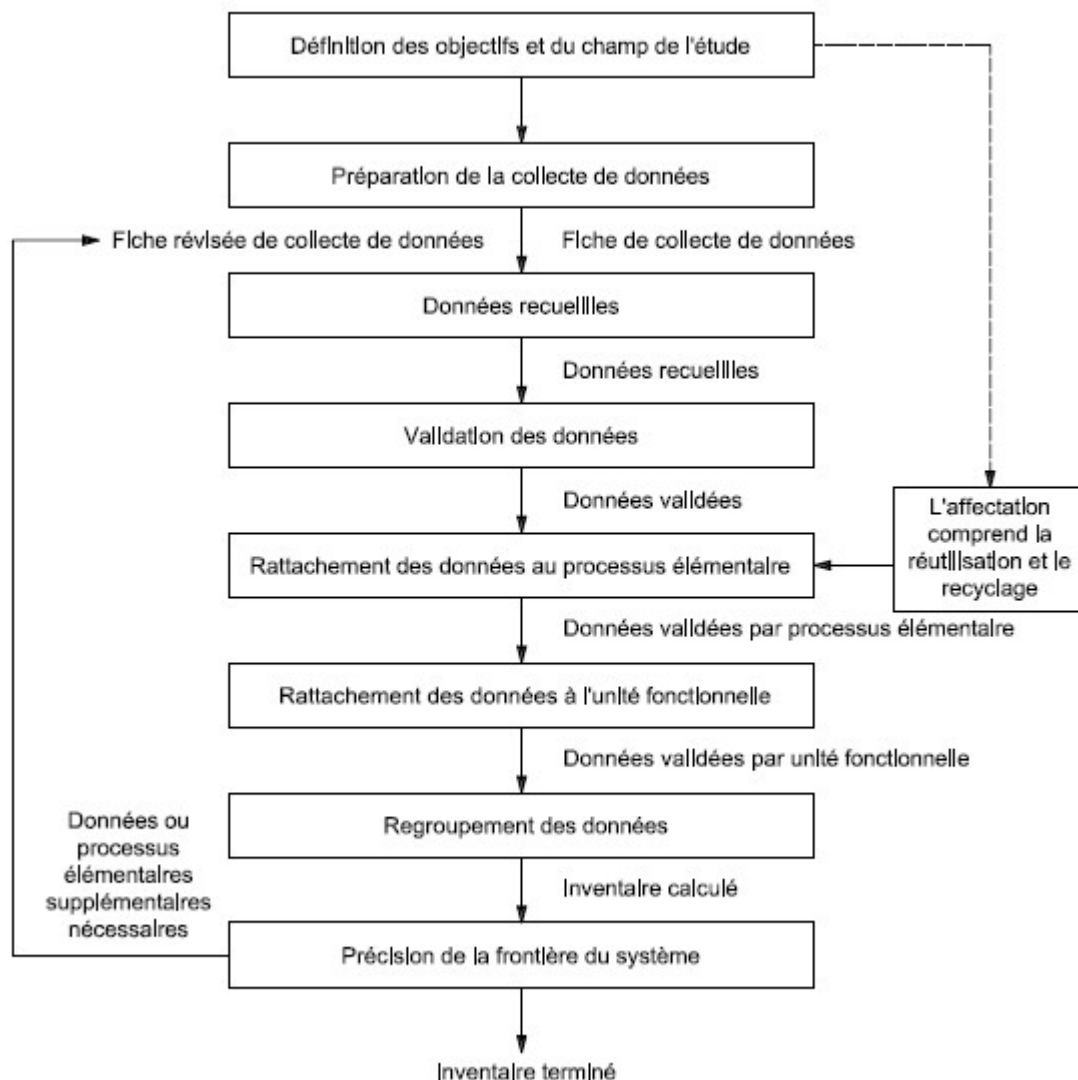
Une fois que la liste des processus élémentaires inclus dans le système de produits est complétée et afin de construire l'inventaire du système et de poursuivre avec l'évaluation des impacts potentiels, les données pertinentes concernant ces processus (c.-à-d. les entrants et les sortants) doivent être collectées. Cependant, avant de faire cette collecte, les exigences relatives à leur qualité (couverture temporelle, géographique et technologique, précision et complétude), leurs sources (spécifiques ou génériques), leur type (mesurées, calculées ou estimées), leur nature (déterministe ou probabiliste), et leur niveau d'agrégation doivent être déterminées afin de respecter les objectifs de l'étude.

### A.3 Phase II de l'ACV : Analyse de l'inventaire du cycle de vie

La seconde phase de l'ACV, appelée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (AICV), est la quantification des flux élémentaires pertinents qui traversent les frontières du système de produits.

<sup>2</sup> Puisque les flux élémentaires quantifiés sont les données d'entrée de l'évaluation des impacts, le choix des impacts à évaluer va affecter le choix des flux élémentaires à suivre.

La procédure de calcul utilisée pour compléter l'inventaire est présentée à la Figure A-2.



**Figure A-2: Procédure de calcul de l'inventaire.**

(tiré de ISO 14 044, 2006)

### **A.3.1 Description des catégories de données**

Les données utilisées dans le cadre de l'AICV vie peuvent être classifiées selon leur source (spécifique ou générique), leur type (mesurées, calculées ou estimées), leur nature (déterministe ou probabiliste) et leur niveau d'agrégation.

#### **A.3.1.1 Classification selon la source**

##### Données spécifiques ou primaires

Les données spécifiques sont collectées à partir des installations associées aux processus élémentaires inclus dans les frontières du système. L'analyste responsable de leur collecte a un accès direct aux

données lors de leur collecte ou a un contrôle direct sur le processus de collecte (c.-à-d. la méthodologie employée). Autrement que pour caractériser les installations incluses dans l'étude, ce type de données n'est pas recommandé à cause de son manque de représentativité, à moins que 1) aucune autre source de données ne soit disponible ou 2) un nombre suffisant d'installations du même secteur industriel fournissent des données afin de calculer des moyennes industrielles représentatives (ces dernières peuvent ainsi devenir des données génériques pour d'autres études).

#### Données génériques ou secondaires

Les données génériques sont obtenues de sources publiées (c.-à-d. bases de données commerciales, littérature spécialisée). L'analyste n'a pas accès aux données lors de leur collecte. Ces données ne sont généralement pas accompagnées de métadonnées<sup>3</sup> suffisantes pour obtenir de l'information sur la méthodologie de collecte et sur la variabilité des données.

### **A.3.1.2 Classification selon le type**

#### Données mesurées

Les données mesurées proviennent d'installations réelles et sont issues d'un programme de surveillance continue (c.-à-d. monitoring) ou d'un programme d'échantillonnage ponctuel. Il est donc potentiellement possible d'obtenir des informations sur leur variabilité et leur distribution.

#### Données calculées

Les données calculées résultent de l'utilisation de modèles afin de représenter des procédés ou des phénomènes. Leur qualité dépend donc de la validité des modèles. Ces données peuvent être validées et/ou suppléées par des données mesurées.

#### Données estimées

Les données estimées incluent celles basées sur le jugement professionnel ou les règles du pouce. Elles ne sont utilisées que lorsqu'aucun autre type de données n'est disponible.

### **A.3.1.3 Classification selon la nature**

#### Données déterministes

Les données déterministes sont représentées par des valeurs uniques (c.-à-d. mesure, résultat de calcul ou estimation) pour chacun des paramètres caractérisés (c.-à-d. flux). Il n'est donc pas possible de connaître la précision et la variabilité des valeurs rapportées.

#### Données probabilistes

Les données probabilistes sont représentées par des plages de valeurs ou des fonctions de distribution de probabilités (p. ex. triangulaire, normale, log-normale) pour chacun des paramètres caractérisés (c.-à-d. flux). Elles rendent ainsi compte de l'imprécision et de la variabilité de la valeur d'un paramètre et permettent éventuellement d'analyser, lors de la phase d'interprétation, l'incertitude des résultats obtenus lors des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts.

---

<sup>3</sup> Informations accompagnant la donnée d'inventaire et qui donne des renseignements à propos de la donnée (par ex. son origine, la méthodologie utilisée lors de sa collecte, les frontières du processus élémentaire décrit).

#### **A.3.1.4 Classification selon le niveau d'agrégation**

Le niveau d'agrégation des données fait référence au nombre de processus élémentaires qui sont représentés par une même donnée. Lorsque complètement désagrégées, les données décrivant une étape spécifique du cycle de vie ou un système de produits sont disponibles pour chaque processus individuel inclus dans l'étape ou le système. À l'inverse, ces mêmes données peuvent être complètement agrégées en une seule donnée, qui à elle seule décrit l'étape ou le système considéré (tous les flux élémentaires d'une même substance sont sommés en un seul flux). Il y a donc une perte d'information avec l'augmentation du niveau d'agrégation puisqu'il n'est plus possible de connaître la contribution individuelle de chacun des processus élémentaires agrégés. Il est parfois difficile d'établir le niveau d'agrégation (et la liste des processus agrégés) des données génériques disponibles dans les bases de données commerciales.

#### **A.3.2 Recueil des données**

Selon la complexité du système de produits étudié (c.-à-d. le nombre et la nature des processus élémentaires inclus dans ses frontières), la quantité de données qui doivent être recueillies est souvent considérable. Le recours à des bases de données d'inventaire commerciales facilite ce processus, en fournissant des données sur plusieurs processus élémentaires (p. ex. production de matériaux et d'énergie, transports). Ces bases de données sont majoritairement européennes et donc, ne sont pas vraiment représentatives du contexte canadien. Elles peuvent toutefois être adaptées à celui-ci si les données qu'elles contiennent sont suffisamment désagrégées et si les informations nécessaires pour le faire sont disponibles<sup>4</sup>. La méthodologie utilisée pour faire la collecte des données doit être clairement présentée.

#### **A.3.3 Validation des données**

Les données recueillies pour chaque processus élémentaire peuvent être validées en 1) les évaluant en relation avec les exigences déterminées durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude quant à leur qualité, et 2) réalisant des bilans de masse ou d'énergie ou des analyses comparatives des facteurs d'émission. Si des anomalies évidentes sont identifiées, des données alternatives conformes aux exigences préalablement établies sont nécessaires.

La disponibilité et la qualité des données pertinentes (p. ex. lacunes dans les données, moyennes génériques au lieu de données spécifiques) vont limiter l'exactitude de l'ACV. Il y présentement un manque de données d'inventaire spécifiques nord américaines, ce qui va affecter les résultats d'études faites au Canada.

---

<sup>4</sup> Des données décrivant la production de certains matériaux en Europe peuvent faire référence à d'autres processus de production de matériaux (par ex. pour des produits intermédiaires ou auxiliaires) ou d'énergie ou des processus de transport. Les données décrivant ces autres processus élémentaires peuvent être remplacés avec des données décrivant les mêmes processus, si disponibles, provenant d'une source plus spécifique au contexte canadien ou nord américain, augmentant ainsi la représentativité géographique des données européennes.

L'absence d'un format de documentation unique<sup>5</sup>, pouvant parfois résulter en une très faible documentation accompagnant les données provenant des bases de données d'inventaire commerciales, peut aussi entraver la collecte et la validation des données en rendant difficile l'évaluation de leur qualité et leur capacité à satisfaire aux exigences établies.

Selon l'ISO, le traitement des données manquantes et des oublis entraîne en règle générale : une valeur de donnée « non zéro » qui est justifiée; une valeur de donnée « zéro » si elle se justifie; ou une valeur calculée sur la base des valeurs communiquées provenant des processus élémentaires faisant appel à une technologie similaire.

#### ***A.3.4 Mise en rapport des données avec le processus élémentaire***

Une fois que les entrants et les sortants de chaque processus élémentaire ont été identifiés, ils sont quantifiés par rapport à un flux de référence déterminé pour chacun des processus (p. ex. 1 kg de matière ou 1 MJ d'énergie). L'ISO stipule que si un processus élémentaire a plus d'un produit (p. ex. une raffinerie pétrolière produit un mélange d'hydrocarbures pétroliers commerciaux) ou entrant (p. ex. un site d'enfouissement sanitaire reçoit des déchets municipaux qui sont un mélange de différents produits), ou s'il recycle des produits intermédiaires ou des déchets en matières premières, les flux de matières et d'énergie ainsi que les émissions dans l'environnement qui leur sont associés, doivent être imputés aux différents co-produits ou co-entrants selon des règles clairement présentées lors de la définition de l'objectif et du champ de l'étude. L'ISO suggère également une série de principes et de procédures afin réaliser cette imputation.

Les règles d'imputation prescrites par l'ISO sont données ci-après en ordre de priorité.

1. Il convient, dans la mesure du possible, d'éviter l'imputation en :
  - subdivisant les processus multifonctionnels en deux ou plusieurs sous-processus (lorsque certains sous-processus sont spécifiques à un seul des coproduits) ;
  - élargissant les frontières, de manière à inclure les fonctions de d'autres systèmes (potentiellement) substituées par les coproduits (et en attribuant au système étudié un crédit environnemental correspondant à l'impact évité des fonctions substituées).
2. Lorsque l'imputation ne peut être évitée, il convient de diviser les flux entrants et sortants des processus multifonctionnels entre les différents coproduits de manière à refléter des relations physiques sous-jacentes entre eux (p. ex. masse ou énergie).
3. Lorsqu'une relation physique ne peut être établie, il convient de répartir les flux entrants et sortants de manière à refléter d'autres relations entre eux (p. ex. la valeur économique des coproduits).

#### ***A.3.5 Mise en rapport des données avec l'unité fonctionnelle***

Les entrants et les sortants de tous les processus élémentaires inclus dans le système de produits sont alors normalisés par rapport à l'unité fonctionnelle et agrégés. Selon l'ISO, le niveau d'agrégation doit

---

<sup>5</sup> Un tel format permettrait un niveau de documentation suffisant et uniforme pour les données génériques provenant des bases de données d'inventaire commerciales. La norme ISO 14 048 (2002), traitant de cette question, est un pas dans la bonne direction.

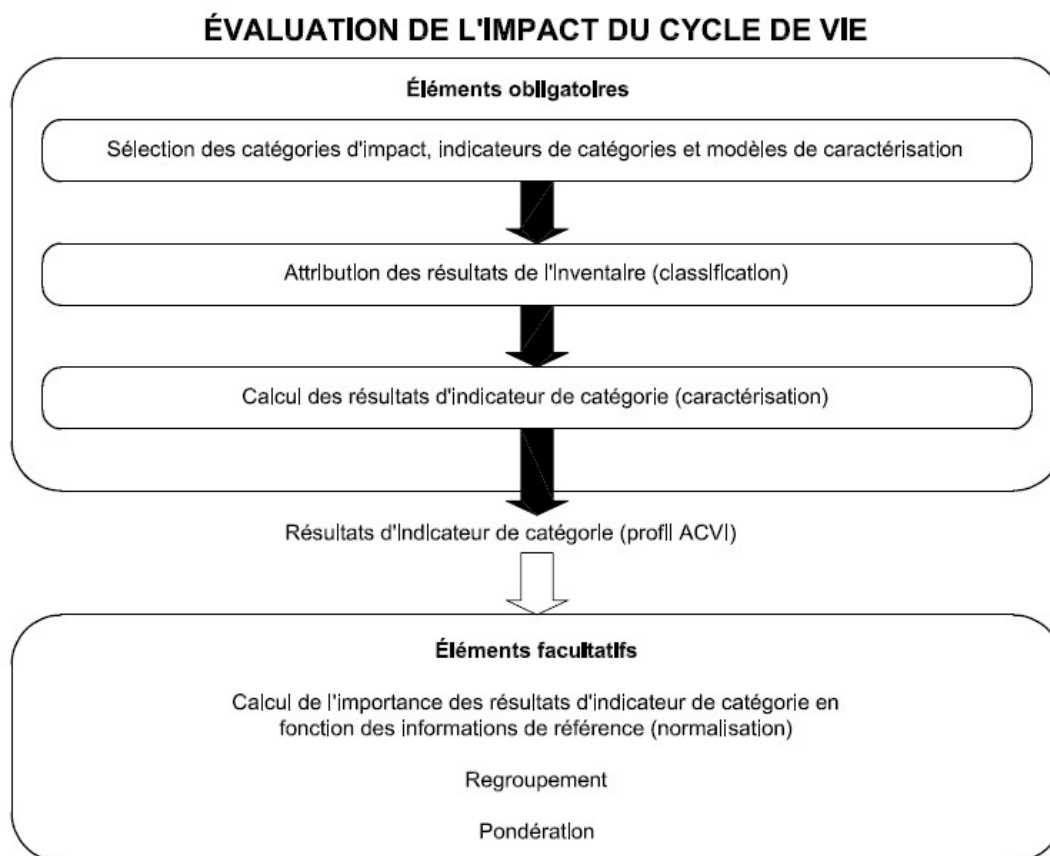
être suffisant pour répondre aux objectifs de l'étude, et les catégories de données (c.-à-d. substances individuelles ou groupes de ressources naturelles ou d'émissions dans l'environnement) ne devraient être agrégées seulement si elles concernent des substances équivalentes et des impacts similaires sur l'environnement.

#### A.4 Phase III de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie

La troisième phase de l'ACV, appelée l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV), est l'interprétation des résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie du système de produits étudié afin d'en comprendre la signification environnementale.

L'analyse de l'inventaire permet la quantification des échanges entre le système de produits et l'environnement. Selon le champ d'étude, l'information obtenue sera plus ou moins importante (c.-à-d. des centaines de flux de ressources naturelles et d'émissions dans l'environnement peuvent être quantifiés) et son utilisation pratique peut s'avérer difficile. Durant la phase d'ÉICV, certains enjeux environnementaux, appelés catégories d'impacts, sont modélisés et des indicateurs de catégories sont utilisés pour condenser et expliquer les résultats de la phase d'inventaire.

Selon l'ISO, le cadre méthodologique de l'ÉICV présente des éléments obligatoires et des éléments optionnels (Figure A-3).

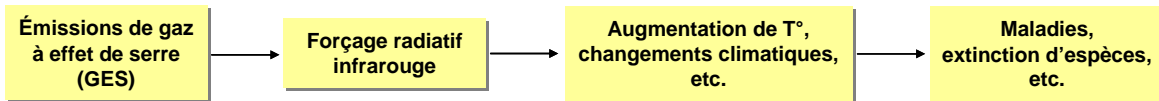


**Figure A-3: Éléments de la phase d'ÉICV.**  
(Tiré de ISO 14 040, 2006)



#### A.4.1 Sélection des catégories d'impacts et des modèles de caractérisation

La première étape est la sélection de **catégories d'impacts** représentant les points environnementaux à problème considérés durant l'étude. Chaque catégorie est identifiée par un **impact final** (c.-à-d. un attribut ou aspect de l'environnement naturel, de la santé humaine ou des ressources naturelles). Un **mécanisme environnemental** (c.-à-d. chaîne de causalité) est alors établi pour relier les résultats d'inventaire aux impacts finaux et un **indicateur de catégorie** est choisi à un endroit quelconque du mécanisme pour agir comme une représentation quantifiable de la catégorie. Par exemple, la Figure A-4 illustre le mécanisme environnemental pour la catégorie d'impact « Réchauffement global ».



**Figure A-4 : Mécanisme environnemental pour la catégorie d'impact « Réchauffement global ».**

Un **modèle de caractérisation** est alors développé afin d'en tirer des **facteurs de caractérisation**, qui seront ensuite utilisés pour convertir les résultats d'inventaire pertinents en résultats d'indicateur de catégorie selon leur contribution relative à la catégorie d'impact. Par exemple, pour la catégorie « Réchauffement global », les facteurs de caractérisation représentent le potentiel de réchauffement global de chacun des gaz à effet de serre (en kg de CO<sub>2</sub>-équivalents/kg de gaz) et peuvent être calculés à partir du modèle de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Les résultats d'inventaire convertis en une unité commune peuvent alors être agrégés en un seul **résultat d'indicateur de catégorie** pour chaque catégorie d'impact. Un exemple des termes utilisés dans le cadre de l'ÉICV pour la catégorie « Réchauffement global » est présenté au Tableau A-1.

**Tableau A-1 : Exemple des termes utilisés dans le cadre de l'ÉICV**

Terme	Exemple	Unité
Catégorie d'impact	Réchauffement global	--
Résultats de l'inventaire	Quantité de gaz à effet de serre (GES) par unité fonctionnelle	kg de gaz
Modèle de caractérisation	Modèle de base sur 100 ans élaboré par l' <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC)	--
Indicateur de catégorie	Forçage radiatif infrarouge	W/m <sup>2</sup>
Facteurs de caractérisation	Potentiel de réchauffement global (GWP <sub>100</sub> ) pour chaque GES	kg d'équivalents CO <sub>2</sub> / kg de gaz
Résultat d'indicateur de catégorie	Somme des résultats d'inventaire caractérisés (c.-à-d. multipliés par leur facteur de caractérisation respectif)	kg d'équivalents CO <sub>2</sub> / unité fonctionnelle
Impacts finaux par catégorie	Maladies, extinction d'espèces, etc.	--
Pertinence environnementale	Le forçage radiatif infrarouge est une donnée indirecte pour des effets potentiels sur le climat, dépendant de l'absorption de chaleur atmosphérique intégrée engendrée par les émissions de la répartition dans le temps de l'absorption de chaleur.	--

(adapté de ISO 14 044, 2006)

Selon l'ISO, il convient que :

- Les catégories d'impacts, les indicateurs de catégorie et les modèles de caractérisation soient acceptés à l'échelle internationale, c'est-à-dire qu'ils soient basés sur un accord international ou approuvés par un organisme international compétent ;
- Le choix des catégories d'impacts reflète un ensemble complet de points environnementaux en rapport avec le système de produits étudié, tout en tenant compte de l'objectif et du champ de l'étude ;
- Le modèle de caractérisation pour chaque indicateur de catégorie soit scientifiquement et techniquement valable, et fondé sur un mécanisme environnemental distinct, identifiable et/ou une observation empirique reproductible ;
- Les choix de valeurs et les hypothèses faites lors du choix des catégories d'impacts, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation soient minimisés.

Les catégories d'impacts souvent considérées en ACV sont les suivantes :

- Réchauffement global
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- Acidification
- Eutrophisation
- Smog photochimique

- Toxicité humaine
- Écotoxicité
- Utilisation des ressources abiotiques
- Utilisation des terres
- Utilisation de l'eau

Cependant, puisqu'il n'y a pas encore une seule méthode ÉICV qui est généralement acceptée, il n'existe pas une liste de catégories d'impacts unique, généralement reconnue et utilisée (Udo de Haes *et al.*, 2002). Couramment, un compromis doit être atteint entre les applications envisagées des résultats et l'applicabilité et la praticabilité du choix des catégories et des modèles associés.

Comme pour les banques de données d'inventaire, la plupart des méthodes ÉICV sont européennes et introduisent un biais lorsque le contexte canadien est considéré. Ceci est particulièrement important pour les catégories d'impacts régionales (smog photochimique, eutrophisation, acidification) et locales (toxicité humaine, écotoxicité, utilisation des terres). Ces catégories étant en effet influencées par les conditions environnementales du milieu récepteur, les modèles de caractérisation utilisés devraient normalement prendre en compte ces caractéristiques<sup>6</sup>. Pour ces catégories d'impacts, le CIRAIG a développé une méthode ÉICV canadienne, LUCAS (Toffoletto *et al.*, 2007), basée sur la méthode américaine TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) (Bare *et al.*, 2003). Cette méthode a l'avantage d'utiliser des modèles de caractérisation adaptés au contexte nord-américain.

Il est par ailleurs à noter que la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.*, 2003) propose des facteurs de caractérisation de la toxicité humaine pour chaque continent. Et, comme présenté par Rochat *et al.* (2006), bien que les substances émises dans différents continents soient associées à des impacts pouvant différer jusqu'à deux ordres de grandeurs, l'impact relatif (c.-à-d. le « *ranking* ») des substances demeure le même pour la plupart. Les auteurs concluent donc que :

- Des facteurs de caractérisation génériques calculés à l'échelle d'un continent, tels que proposés par la plupart des méthodes ÉICV, sont normalement valables, sur une base comparative, pour d'autres continents ;
- Des facteurs de caractérisation spécifiques aux milieux récepteurs doivent être utilisés lorsque l'étude s'intéresse aux résultats absolus ou lorsque la comparaison vise des scénarios impliquant des émissions dans des milieux récepteurs très différents.

#### **A.4.2 Classification et caractérisation des résultats d'inventaire**

Une fois que les catégories d'impacts ont été sélectionnées, les flux élémentaires inventoriés sont affectés (c.-à-d. classés) à ces catégories selon leurs effets prédits. Certains peuvent être exclusivement affectés à une seule catégorie alors que d'autres peuvent être affectés à plus d'une catégorie lorsque sont considérés des mécanismes d'effets parallèles ou en série.

Les résultats d'inventaire affectés sont ensuite convertis grâce aux facteurs de caractérisation appropriés et aux unités communes des indicateurs de catégorie, et les résultats convertis pour chaque catégorie

---

<sup>6</sup> Les modèles de caractérisation utilisés pour les impacts ayant des répercussions à l'échelle globale (c.-à-d. le réchauffement global, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'utilisation des ressources abiotiques et de l'eau) sont les mêmes quel que soit le lieu d'émission ou d'extraction des ressources.

sont agrégés pour obtenir un résultat d'indicateur sous forme numérique. L'ensemble des résultats d'indicateur forme le **profil d'ÉICV**.

Concernant ce profil, deux éléments doivent être spécialement notés :

1. L'amplitude calculée des impacts considérés ne représente qu'une potentialité puisqu'elle est basée sur des modèles décrivant les mécanismes environnementaux et donc une simplification de la réalité<sup>7</sup>.
2. Les substances non définies (c.-à-d. celles qui n'ont pas de facteur de caractérisation dû à un manque d'information, comme les données (éco)toxicologiques par exemple) qui ne sont pas incluses dans les calculs augmentent l'incertitude des résultats.

#### **A.4.3 Éléments optionnels**

Selon l'ISO, l'objectif du calcul de l'amplitude des résultats d'indicateur de catégorie par rapport à une information de référence (c.-à-d. **normalisation**) est de mieux comprendre l'amplitude relative de chaque résultat d'indicateur du système de produits étudié. L'information de référence peut être :

1. les émissions ou utilisations de ressources totales pour une zone géographique donnée qui peut être mondiale, régionale, nationale ou locale;
2. les émissions ou utilisation de ressources totales pour une zone donnée (mondiale, régionale ou locale) par habitant ou mesure similaire;
3. un scénario de référence, tel un autre système de produits donné.

Cette étape optionnelle peut s'avérer utile pour un contrôle de cohérence par exemple. Elle présente également l'avantage de convertir tous les résultats d'indicateur de catégorie dans une même unité (p. ex. équivalent personne), un pré requis pour les éléments optionnels suivants.

Selon l'ISO :

1. le **groupement** consiste à affecter les catégories d'impacts en une ou plusieurs séries telles que prédéfinies dans la définition de l'objectif et du champ de l'étude, et il peut impliquer un tri sur une base nominale (p. ex. par caractéristiques telles que les émissions et ressources ou échelles spatiales mondiales, régionales et locales) et/ou un classement par rapport à une hiérarchie donnée (p. ex. priorité élevée, moyenne et basse);
2. la **pondération** est le processus de conversion des résultats d'indicateur des différentes catégories d'impacts en utilisant des facteurs numériques. Elle peut inclure l'agrégation de résultats d'indicateurs pondérés en un score unique.

Ces éléments optionnels impliquent des choix de valeurs et ainsi, différents individus, organismes et sociétés peuvent avoir des préférences différentes et peuvent, par conséquent, obtenir des résultats de groupement et de pondération différents à partir des mêmes résultats d'indicateurs caractérisés.

La méthodologie (c.-à-d. sélection des catégories d'impacts, des indicateurs de catégories, des modèles de caractérisation et des éléments optionnels) utilisée pour réaliser l'évaluation des impacts potentiels doit être clairement présentée durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude.

---

<sup>7</sup> La divergence entre les prédictions des modèles et la réalité est accrue pour la plupart du fait qu'ils sont basés sur le contexte européen. Ceci est particulièrement important pour les impacts régionaux et locaux tels l'acidification et l'écotoxicité.

## A.5 Phase IV de l'ACV : Interprétation

Les objectifs de la quatrième phase de l'ACV, appelée interprétation, sont d'analyser les résultats, d'établir des conclusions, d'expliquer les limites et de fournir des recommandations en se basant sur les résultats des phases précédentes de l'étude et de rapporter les résultats de l'interprétation du cycle de vie de manière transparente de façon à respecter les exigences de l'application telles que décrites dans l'objectif et le champ de l'étude.

Idéalement, l'interprétation se fait de façon interactive avec les trois autres phases de l'ACV, avec les phases de définition de l'objectif et du champ de l'étude et d'interprétation du cycle de vie formant le cadre de l'étude et les phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts fournissant les informations relatives au système de produits.

Selon l'ISO, l'interprétation du cycle de vie comporte trois éléments :

1. l'identification des points significatifs à partir des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude;
2. la vérification, qui prend en compte les contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence;
3. les conclusions, les recommandations et la rédaction d'un rapport.

La vérification a pour objectifs d'établir et de renforcer la confiance dans les résultats de l'étude, ainsi que leur fiabilité. Le **contrôle de complétude** a pour objectif de garantir que toutes les informations et données pertinentes nécessaires à l'interprétation sont disponibles et complètes. Le **contrôle de sensibilité** a pour objectif de vérifier la fiabilité des résultats et des conclusions en déterminant s'ils sont affectés par des incertitudes dans les données et les divers choix méthodologiques (p. ex. les critères d'inclusion, les méthodes d'imputation ou les indicateurs de catégorie). Le **contrôle de cohérence** a pour objectif de déterminer si les hypothèses, les méthodes et les données sont cohérentes avec l'objectif et le champ de l'étude et si elles ont été appliquées de façon constante durant toute l'étude, et dans le cas d'une comparaison entre diverses alternatives, aux systèmes de produits comparés.

L'interprétation des résultats est également entravée par la nature déterministe des données d'inventaire et d'évaluation des impacts généralement disponibles, puisque celle-ci empêche l'analyse statistique et quantitative de l'incertitude des résultats associée à l'utilisation de telles données. Ceci affecte le niveau de confiance que l'on peut avoir en ces résultats déterministes; les conclusions et recommandation qui en seront tirées pourraient manquer de nuance, voire être erronées, du fait qu'il est impossible de quantifier la variabilité de ces résultats ou de déterminer s'il y a une différence significative d'impacts entre deux alternatives. La méthodologie (c.-à-d. les types de contrôles) qui sera utilisée pour conduire l'interprétation des résultats doit être clairement présentée durant la définition de l'objectif et du champ de l'étude.

## A.6 Références

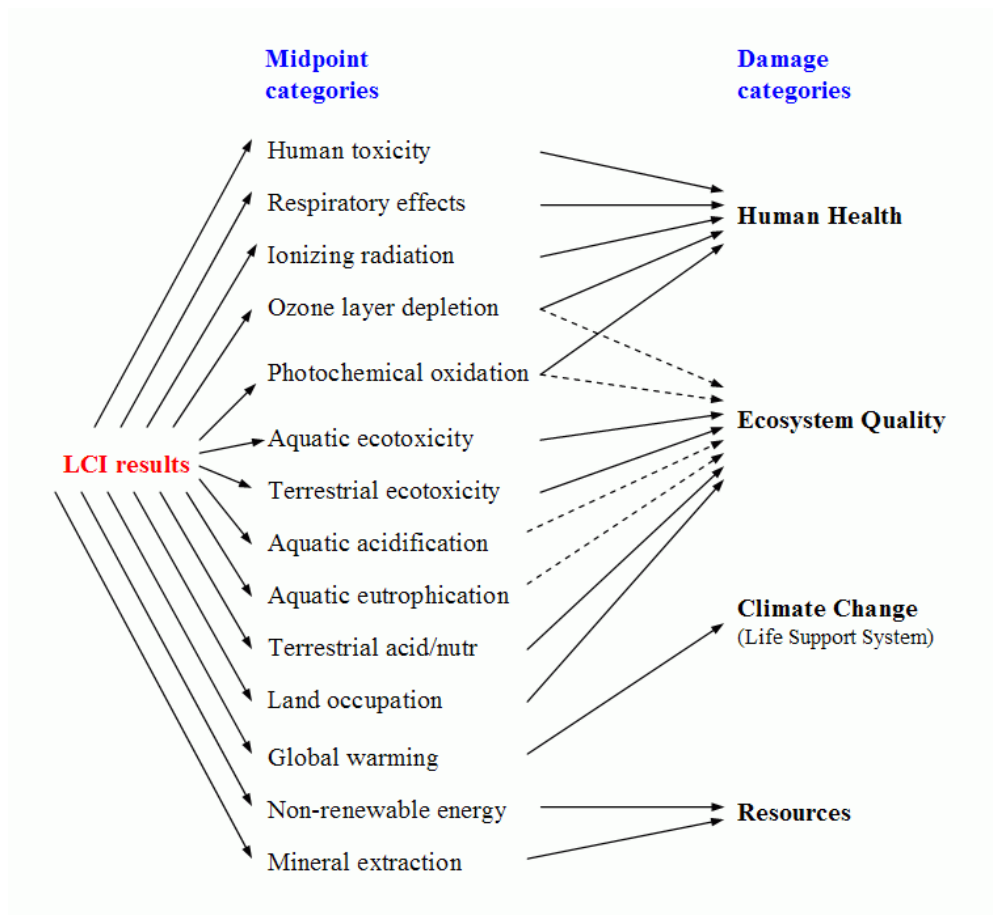
- BARE, J., NORRIS, G.B., PENNINGTON, D.W., MCKONE, T. (2003). TRACI – The tool for the Reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. Journal of Industrial Ecology, 6(3-4), pp. 49-78.
- ISO 14 040 (2006). « Management environnemental – Analyse du cycle de vie - Principes et cadre », Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO 14 044 (2006). Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie, Organisation internationale de normalisation, 19 p.
- ISO 14 048 (2002). « Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Format de documentation de données », Organisation internationale de normalisation, 45 p.
- Joliet, O., MARGNI, M., CHARLES, R., HUMBERT, S., PAYET, J., REBITZER, G., ROSENBAUM, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, International Journal of Life Cycle Assessment 8(6), pp. 324-330.
- ROCHAT, D., MARGNI, M., *et al.* (2006). Continent-specific intake fractions and characterization factors for toxic emissions: Does it make a difference? International Journal of Life Cycle Assessment 11 pp. 55-63.
- TOFFOLETTO, L., BULLE, C., GODIN, J., REID, C. et DESCHÊNES, L. (2007). LUCAS - A new LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. International Journal of LCA, 12(2), pp. 93-102.
- UDO DE HAES, H., JOLLIET, O., FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M., KREWITT, W., MÜLLER-WENK, R. (1999). “Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment – Part II” Background document for the Second Working Group on Life Cycle Impact Assessment of SETAC-Europe, International Journal of LCA, 4 (3), pp. 167-174.
- UDO DE HAES, H., JOLLIET, O., FINNVEDEN, G., GOEDKOOP, M., HAUSCHILD, M., HERTWICH, E., HOFSTETTER, P., KLÖPPER, W., KREWITT, W., LINDEIJER, E., MUELLER-WENK, R., OLSON, S., PENNINGTON, D., POTTING, J. et STEEN, B. (2002). “Life Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practice” Published by the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, FL, USB. 272 p.

**Annexe B :**  
**Méthode ÉICV IMPACT 2002+**

---

## IMPACT 2002+

The LCIA methodology IMPACT 2002+ (Jolliet et al. 2003) proposes a combined midpoint/damage-oriented approach. Figure B-1 shows the overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking all types of LCI results via 14 midpoint categories (human toxicity, respiratory effects, ionizing radiation, ozone layer depletion, photochemical oxidation, aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, terrestrial acidification/nutritation, aquatic acidification, aquatic eutrophication, land occupation, global warming, non-renewable energy, mineral extraction) to four damage categories (human health, ecosystem quality, climate change, resources). An arrow symbolizes that a relevant impact pathway is known and quantitatively modelled based on natural science. Impact pathways between midpoint and damage levels that are assumed to exist, but that are not modeled quantitatively due to missing knowledge are represented by dotted arrows.



**Figure B-1: Overall scheme of IMPACT 2002+, linking the life cycle inventory results (LCI) and the damage categories, via the midpoint categories.**

New concepts and methods for the comparative assessment of human toxicity and ecotoxicity were developed for the IMPACT 2002+ methodology. For other categories, methods have been transferred or adapted mainly from the Eco-indicator 99 (Goedkoop et al. 2000) and the CML 2002 (Guinée et al. 2002) methods, from the IPCC list (IPCC 2001), the USEPA ODP list (EPA) and ecoinvent database (ecoinvent Centre, 2005).



By the following we shortly describe the main assessment characteristics for midpoint and damage categories, as well as related normalization factors.

Midpoint categories are:

1. Human Toxicity measures the impact on human life related to carcinogen and non-carcinogens toxic effects caused by pollutants emitted into the environment and eventually reaching the humans through air inhalation, drinking water and food ingestion. Carcinogen and non-carcinogens are separated in two indicators in the analysis realised in the present study.
2. Respiratory Inorganics are air pollutants such as fine particles that affect human lungs. These pollutants are massively released by heavy industries and road traffic.
3. Ionizing Radiation measures the impact on human life caused by substances emitting ionizing radiations. These substances are mainly released by the nuclear energy sector.
4. Ozone Layer Depletion measures the potential in reducing the stratospheric ozone layer and thus the increase in UV light reaching the earth. It can therefore generate impact on human life such as skin cancer and cataract, and damage terrestrial life and aquatic ecosystems. The pollutants destroying the ozone layer, such as CFCs are emitted by some specific industrial processes, in need, for example, for strong cooling systems.
5. Photochemical Oxidation measures the effects on human health (and eventually on crop growth) associated with tropospheric ozone formation (also called summer smog formation). Pollutants responsible for tropospheric ozone such as NO<sub>x</sub> and Volatiles Organic Carbons (VOCs) are mainly emitted by road traffic and industrial activities.
6. Aquatic Ecotoxicity measures the effects on fresh water ecosystems in term of loss in biodiversity caused by toxic emissions emitted into the environment.
7. Terrestrial Ecotoxicity measures the effects on terrestrial ecosystems in term of loss in biodiversity caused by toxic emissions emitted into the environment.
8. Aquatic Acidification literally refers to processes increasing the acidity in aquatic systems that may lead to declines in fish populations and disappearances of species. These substances such as airborne nitrogen (NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub>) and sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) are mainly emitted by heavy oil and coal combustion for electricity production, and by road traffic.
9. Aquatic Eutrophication measures the potential of nutrient enrichment of the aquatic environment, which generates a growth of biomass that pushes this ecosystem population out of balance: decrease of oxygen leads to further fish kills and disappearance of bottom fauna. These nutrients are mainly associated with phosphorus and nitrogen compounds in detergents and fertilizers.
10. Terrestrial Acidification and Nutrification measure the potential change in nutrient level and acidity in the soil leading to a change of the natural condition for plant growth and competition. A reduction of species are observed with an excess of nutrients and a decrease in forest health by soil acidification (effect on biodiversity). Acidifying and nutrifying substances such as NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub> are massively released by heavy industries and road traffic.
11. Land Occupation measures the reduction of biodiversity caused by the use of land. Agriculture (farming) is the main contributor to this category.
12. Global Warming covers a range of potential impacts resulting from a change in the global climate. It is the measured heat-trapping effect of a greenhouse gas (GHG) released in the atmosphere. CO<sub>2</sub> emitted by fossil fuel combustion is the main GHG.

13. Primary Non-Renewable Energy measures the amount of energy extracted from the earth contained in the fossil energy carrier (coal, oil and natural gas) or uranium ore. These resources are subject to depletion. Electricity, heat and fuel production and consumption are the main consumer of fossil fuels and uranium ore.
14. Mineral Extraction measures the surplus of energy associated with the additional effort required to extract minerals from lower concentration ore mines.

The indicators of each midpoint impact category have units expressed in kg of substance equivalent that are linked to the following 4 damage indicators (Table B-1 and B-2):

- Human health (DALY). Human toxicity (carcinogenic and non-carcinogenic effects), respiratory effects (inorganics and organics), ionizing radiation, and ozone layer depletion all contribute to human health damages.
- Ecosystems quality (PDF·m<sup>2</sup>·yr), measure how far the anthropogenic processes affect the natural development of the occurrence of species within their habitats. Their impact can directly be determined as a Potentially Disappeared Fraction over a certain area and during a certain time per kg of emitted substance, expressed in [PDF.m<sup>2</sup>.year/kg emitted]. It includes the contribution of terrestrial acidification/nitrification, land occupation and terrestrial + aquatic ecotoxicity.
- Resources depletion (MJ primary non-renewable energy) and. The two midpoint categories contributing to this endpoint are mineral extraction and non-renewable energy consumption. Damages due to mineral resource extraction are specified according to Eco-indicator 99, with the concept of surplus energy (in [MJ]). This is based on the assumption that a certain extraction leads to an additional energy requirement for further mining of this resource in the future, caused by lower resource concentrations or other unfavorable characteristics of the remaining reserves (Goedkoop et al. 2000).
- Climate change (kg CO<sub>2</sub> equivalent into air). From the authors' point of view, the modeling up to the damage of the impact of climate change on ecosystem quality and human health is not accurate enough to derive reliable damage characterization factors. The interpretation, therefore, directly takes place at midpoint level, which can be interpreted as damage on life support systems that deserve protection for their own sake. The global warming is considered as a stand-alone endpoint category with units of [kg-eq CO<sub>2</sub>], which is normalized in the next step. The assumed time horizon is also 500 years to account for both short-term and long-term effects as there is little evidence that global warming effects will decrease in the future.

**Table B-1: Number of substances covered, source and units of IMPACT 2002+ (v2.1)**

LCI coverage	Midpoint category	Reference	Midpoint reference substance	Damage unit	Damage unit	Normalized damage unit
769	Human toxicity (carcinogens + non-carcinogens)	IMPACT 2002	kg chloroethylene <sub>eq</sub>	Human Health	DALY	point
12	Respiratory (inorganics)	Ecoindicator 99	kg chloroethylene <sub>eq</sub>			
25	Ionizing radiations	Ecoindicator 99	kg PM2.5 <sub>eq</sub>			
95	Ozone layer depletion	USEPA and Ecoindicator 99	Bq Carbon-14 <sub>eq</sub>			
130	Photochemical oxidation	Ecoindicator 99	kg CFC-11 <sub>eq</sub>			
393	Aquatic ecotoxicity	IMPACT 2002	kg ethylene <sub>eq</sub>	Ecosystem Quality	PDF·m <sup>2</sup> ·yr	point
393	Terrestrial ecotoxicity	IMPACT 2002	kg triethylene glycol <sub>eq</sub> into water			
5	Terrestrial acidification/nutrication	Ecoindicator 99	kg triethylene glycol <sub>eq</sub> into soil			
15	Land occupation	Ecoindicator 99	m <sup>2</sup> organic arable land			
10	Aquatic acidification	CML 2002	kg SO <sub>2</sub> <sub>eq</sub>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>
10	Aquatic eutrophication	CML 2002	kg PO <sub>4</sub> <sup>---</sup> <sub>eq</sub>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>	<i>n/a</i>
77	Global warming	IPCC 2001 (500 yr)	kg CO <sub>2</sub> <sub>eq</sub>	Climate Change (life supporting functions)	kg CO <sub>2</sub> <sub>eq</sub> into air	
9	Non-renewable energy	Ecoinvent	MJ/kg crude oil <sub>eq</sub>	Ressource depletion	MJ primary non-renewable energy	
20	Mineral extraction	Ecoindicator 99	MJ/kg iron <sub>eq</sub>			

**Table B-2: Units of midpoint impact categories and conversion factors between the midpoint categories and the damage categories of IMPACT 2002+ (v2.1).**

Midpoint category	Damage Factor	Unit
Carcinogens	$2.80 \cdot 10^{-6}$	DALY/kg chloroethylene <sub>eq</sub>
Non-carcinogens	$2.80 \cdot 10^{-6}$	DALY/kg chloroethylene <sub>eq</sub>
Respiratory (inorganics)	$7.00 \cdot 10^{-4}$	DALY/kg PM2.5 <sub>eq</sub>
Ionizing radiations	$2.10 \cdot 10^{-10}$	DALY/Bq Carbon-14 <sub>eq</sub>
Ozone layer depletion	$1.05 \cdot 10^{-3}$	DALY/kg CFC-11 <sub>eq</sub>
Photochemical oxidation	$2.13 \cdot 10^{-6}$	DALY/kg ethylene <sub>eq</sub>
Aquatic ecotoxicity	$5.02 \cdot 10^{-5}$	PDF·m <sup>2</sup> ·yr/kg triethylene glycol <sub>eq</sub> into water
Terrestrial ecotoxicity	$7.91 \cdot 10^{-3}$	PDF·m <sup>2</sup> ·yr/kg triethylene glycol <sub>eq</sub> into soil
Terrestrial acidification/nutrication	1.04	PDF·m <sup>2</sup> ·yr/kg SO <sub>2-eq</sub>
Aquatic acidification	1	kg SO <sub>2-eq</sub> /kg SO <sub>2-eq</sub>
Aquatic eutrophication	1	kg PO <sub>4-<sup>---</sup>eq/kg PO<sub>4-<sup>---</sup>eq</sub></sub>
Land occupation	1.09	PDF·m <sup>2</sup> ·yr/m <sup>2</sup> organic arable land
Global warming	1	kg CO <sub>2-eq</sub> /kg CO <sub>2-eq</sub>
Non-renewable energy	45.8	MJ/kg crude oil <sub>eq</sub>
Mineral extraction	$5.10 \cdot 10^{-2}$	MJ/kg iron <sub>eq</sub>

The normalization is performed by dividing the impact scores by the respective normalization factors (cf. Table B-3). A normalization factor represents the total impact of the specific category divided by the total European population. The total impact of the specific category is the sum of the products between all European emissions and the respective damage factors.

The normalized characterization factor is therefore determined by the ratio of the impact per unit of emission divided by the total impact of all substances of the specific category, per person per year. The unit of all normalized characterization factors is therefore [point/unit<sub>emission</sub>] = [pers·yr/unit<sub>emission</sub>], i.e. it is the impact caused by a unitarian emission, which is equivalent to the impact generated by the given number of persons during 1 year. Additional details are provided by Humbert et al. (2005).

**Table B-3: Normalization factors relative to the four damage categories for Western Europe**

Damage categories	Normalization factors	Units
Human Health	0.0071 <sup>48</sup>	DALY/point
Ecosystem Quality	13'700	PDF·m <sup>2</sup> ·yr/point
Climate Change	9'950	kg CO <sub>2</sub> into air/point
Resources	152'000	MJ/point

## Bibliography

- ecoinvent Centre (2005). ecoinvent data v1.2, Final reports ecoinvent 2000 No. 1-16. ISBN 3-905594-38-2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Goedkoop M., Effting S., et al. (2000). The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Amersfoort, The Netherlands, PRé Consultants B.V.: 22.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. d., Oers L. v., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., Bruijn H. d., Duin R. v., Huijbregts M.A.J. (2002), Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Humbert, S., M. Margni and O. Joliet (2005). IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version 2.1. Lausanne, Switzerland, EPFL: 33.
- Joliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R. (2003). "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology." Int Journal of LCA, 8 (6) p. 324-330

## **Annexe C : Données et hypothèses**

---

## Paramètres généraux

Nom	Valeur	Unité/Comment.	Distribution	Min	Max	
Climatisation_residence	3855 MJ/an (climatisation, basé sur 25,7 MJ/m² Donnée OEE, 2009)		Undefined	0	0	0
Cons_annuelle_chauffage	359,1 (en MJ/m².an) consommation annuelle d'énergie pour le chauffage de la maison d'un ménage québécois m		Uniform	0	261	457,2
Cons_annuelle_eau_chaude	6352,5 (en kWh/an) consommation annuelle d'eau chaude par un ménage québécois moyen selon l'OEE (Min) et H		Uniform	0	5580	7125
Consom_residence	24660 (2,2,2,1,1,na)kWh/an (chauffage et eau chaude)		Lognormal	1,08	0	0
COP_Climatiseur	2,9 Tiré de CIRAIG (2008)Rapport ampoules		Undefined	0	0	0
COPair	3,5 Coefficient de performance du système géoth. eau-air		Undefined	0	0	0
COPeau	3,9 Coefficient de performance du système géoth. eau-eau		Undefined	0	0	0
FM_ChauffageEau	0,3 facteur multiplicateur pour ramener le chauffe-eau de 600 litres à 200 litres (60 gal) - voir fichier excel "Hyp		Undefined	0	0	0
LifeSpan_chauffage_eau	12 ans. Durée de vie d'un chauffe-eau électrique standard.		Undefined	0	0	0
LifeSpan_ESOLAIR	37,5 ans. Durée de vie des capteurs à air vitrés; default = 37,5 ans		Undefined	0	0	0
LifeSpan_FlatPlate	25 ans. Durée de vie des collecteurs plats; default = 25 ans		Undefined	0	0	0
LifeSpan_pompe_solaire	10 ans. Durée de vie des pompes à eau pour systèmes solaires		Undefined	0	0	0
LifeSpan_plinthe	25 ans. Durée de vie d'une plinthe électrique.		Undefined	0	0	0
LifeSpan_TubeColl	25 ans. Durée de vie des collecteurs à tubes sous vide; default = 25 ans		Undefined	0	0	0
LifeSpan_geothermie_global	50 ans. Correspond à la durée de vie des infrastructures de base (boucle souterraine).		Undefined	0	0	0
LifeSpan_boucle_Geothermie	50 ans. Durée de vie de la boucle souterraine des systèmes géothermiques.		Undefined	0	0	0
LifeSpan_pompe_Geothermie	20 ans. Durée de vie de la pompe à chaleur des systèmes géothermiques		Undefined	0	0	0
LifeSpan_plancher_radiant	50 ans. Durée de vie des planchers radiants.		Undefined	0	0	0
LifeSpan_SystVent	50 ans. Durée de vie du système de ventilation (conduites)		Undefined	0	0	0
LifeSpan_ventilo	20 ans. Durée de vie du ventilateur des systèmes de ventilation.		Undefined	0	0	0
Nbr_collAir	2 Nombre de collecteurs chauffe-air; default = 2		Triangle	0	2	8
Nbr_m2_CollPlats	6 m² de surface de collecteurs plats installée		Triangle	0	4	10
Nbr_m2_CollTubes	10,5 m² de surface de collecteurs tubes installée (default = 10,5 m²)		Triangle	0	10	20
PourcentDemAir_GeothAir	1 fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'air que remplit le sys geoth. eau-air		Undefined	0	0	0
PourcentDemAir_GeothEau	1 fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'air que remplit le sys geoth. eau-eau		Undefined	0	0	0
PourcentDemEau_GeothAir	0,14 fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'eau que remplit le sys geoth. eau-air		Undefined	0	0	0
PourcentDemEau_GeothEau	0,14 fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'eau que remplit le sys geoth. eau-eau		Undefined	0	0	0
PourcentDemThMaison_toAir	0,75 fraction de la demande en énergie thermique de la résidence qui va à chauffer les espaces (i.e. l'air) (voir fic		Undefined	0	0	0
PourcentDemThMaison_toEau	0,25 fraction de la demande en énergie thermique de la résidence qui va à chauffer l'eau sanitaire (voir fichier d		Undefined	0	0	0
PourcentMjthGeo_toAir	0,95 fraction du MJ produit par les sys géothermiques modélisés qui va au chauffage de l'air		Undefined	0	0	0
PourcentMjthGeo_toEau	0,05 fraction du MJ produit par les sys géothermiques modélisés qui va au chauffage de l'eau		Undefined	0	0	0
PourcentMthTubes_toAir	0,5 % du MJ produit par le sys solaire à coll à tubes modélisés qui va au chauffage de l'air (choix arbitraire) - tes		Undefined	0	0	0
PourcentMthTubes_toEau	0,5 fraction du MJ produit par le sys solaire à coll à tubes modélisés qui va au chauffage de l'eau (choix arbitrai		Undefined	0	0	0
surface_maison	150 m²		Undefined	0	0	0
T_maintenance	50 km_Trp maintenance		Undefined	0	0	0
T_ress_interna	7000 km_Trp approvisionnement maritime		Undefined	0	0	0
T_ress_local	500 km_Trp approvisionnement Qc vers Qc (ou EU vers EU)		Undefined	0	0	0
T_ress_region	1500 km_Trp approvisionnement Canada/EU vers Qc		Undefined	0	0	0
T_waste	50 km_Trp déchets		Undefined	0	0	0
Trp_eoliennes	1500 km. Distance de transport des composantes éoliennes.		Undefined	0	0	0
Yield_collAir	1500 kWh/capteur-an (basé sur les données MC² Énergie) default = 1500 kWh/capteur-année		Undefined	0	0	0
Yield_CollPlats	539 (kWh/m² de panneau) Rendement des panneaux à coll. plats (basé sur les données du rapport ecoinvent) d		Triangle	0	539	600
Yield_CollTubes	496 (kWh/m² de panneau) Rendement des panneaux à tubes sous-vide (basé sur les données du rapport ecoinv		Triangle	0	496	550
Yield_geothermie	72000 MJ/an d'énergie utile produite		Undefined	0	0	0

### Database Calculated parameters

Nom	Valeur	Unité/Comment.
PourcentDemEau_CollPlats	(Yield_CollPlats*Nbr_m2_CollPlats)/((7125+5580)/2) = 0,509	fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'eau que remplit le sys th. solaire à coll. plats - default = 51% (avec 6m² de panneaux)
PourcentDemAir_CollTubes	(Yield_CollTubes*0,5*Nbr_m2_CollTubes)/(19080) = 0,136	fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'air que remplit le sys th. solaire à coll. tubes (10,5 m² de panneau) - default = 14%
PourcentDemEau_CollTubes	(Yield_CollTubes*0,5*Nbr_m2_CollTubes)/((7125+5580)/2) = 0,41	fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'eau que remplit le sys th. solaire à coll. tubes (10,5 m² de panneau) - default = 41%
PourcentDemAir_CollAir	Yield_collAir*Nbr_collAir/19080 = 0,157	fraction de la demande d'énergie pour le chauffage de l'air que remplit le sys th. solaire chauffe- air
LifeSpanOutput_CollAir	Nbr_collAir*Yield_collAir*LifeSpan_ESOLAIR*3,6 = 4,05E5	MJ - sur 37,5 ans, pour un sys ESOLAIR 2.0 (chauffage de l'air) (source : MC2 Énergie)
LifeSpanOutput_FlatPlate	Nbr_m2_CollPlats*Yield_CollPlats*LifeSpan_FlatPlate*3,6 = 2,91E5	MJ - sur 25 ans, pour un sys de chauffage de l'eau (source: rapport ecoinvent, données de 2002)
LifeSpanOutput_TubeColl	Nbr_m2_CollTubes*Yield_CollTubes*LifeSpan_TubeColl*3,6 = 4,69E5	MJ - sur 25 ans, pour un sys combiné (chauffage de l'eau et de l'air) (source : rapport ecoinvent, données de 2002)

## RA - Système de référence

Nom		Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires /hypothèses / Référence		
Ref - 100% électricité			1 MJ	Energy			
		Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau		PourcentDemThMaison_toEau = 0,25 MJ	Undefined		
		Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère		PourcentDemThMaison_toAir = 0,75 MJ	Undefined		
No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD <sup>1</sup>	Commentaires /hypothèses / Référence
							Demande moyenne annuelle en énergie pour le chauffage de l'eau (2011) (voir onglet "Calculs - demande résidence)
		Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	1 MJ	Energy			Hypothèse: Chauffe-eau bien isolé. Perte de chaleur dans les tuyaux pas prise en compte car les mêmes pour tous les systèmes
R1		P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons	1/((Cons_annuelle_eau_chaude*3,6)*LifeSpan_chauffe_eau) = 3,64E-6 p		Undefined		
		I40_Réservoir à eau chaude	1/((Cons_annuelle_eau_chaude*3,6)*LifeSpan_chauffe_eau) = 3,64E-6 p		Undefined		
		G40_Réservoir à eau chaude	1/((Cons_annuelle_eau_chaude*3,6)*LifeSpan_chauffe_eau) = 3,64E-6 p		Undefined		
		Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011	1 MJ		Undefined		
		P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons	1 p	Amount			Adapté de Hot water tank 600l, at plant/CH/I U (hypothèse: production québécoise)
		Voir onblet 1A.					Tous les flux ont été multiplié par 0.3 pour ramener le volume et le poids à un réservoir de 200l (40 à 60 gallon), Ref. Table 5.7 rapport ecoinvent 06 (solar heat)
		I40_Réservoir à eau chaude	1 p	Amount			
		Voir onblet 1A.					
							Adapté de Hot water tank 600l, at plant/CH/I U (hypothèse: production québécoise)
		G40_Réservoir à eau chaude	1 p	Amount			Tous les flux ont été multipliés par 0.3 pour ramener le volume et le poids à un réservoir de 200l (40 à 60 gallons).
		Voir onblet 1A.					
							Il est présumé que le filage électrique depuis la ligne basse tension jusqu'à la maison est nécessaire, de même que le filage dans la maison, la plomberie dans la maison, le raccordement au réseau d'égout municipal. Ces élément ne sont donc pas modélisés car identiques par hypothèse pour tous les scénarios.
		Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	1 MJ	Energy			
		P_Plinthe électrique de 1000W	Nb_plinthes/(cons_annuelle_chauffage*surface_maison*LifeSpan_plinthe) = 1,2E-5 p		Undefined		
		I_Plinthe électrique	Nb_plinthes/(cons_annuelle_chauffage*surface_maison*LifeSpan_plinthe) = 1,2E-5 p		Undefined		
		Electricity, low voltage, at grid - Qc U_modif pertes, 2011	1 MJ		Undefined		
		G_Plinthe électrique	0 p				Le métal est considéré recyclé à 100% (approche cut off)
		Paramètres locaux					
		surface_pi2_maison	1615	pi²			Surface d'une maison résidentielle de 150 m² = 1615 pi²
							1000W permet de chauffer une pièce de 100 p² selon RONA
		capacité_pi2_chauf_1000W	100	pi2			(Source : <a href="http://www.rona.ca/content/installer-plinthe-electrique_chauffage_chauffage-ventilation-climatisation_renovation">http://www.rona.ca/content/installer-plinthe-electrique_chauffage_chauffage-ventilation-climatisation_renovation</a> )
		Nb_plinthes	surface_pi2_maison/capacite_pi2_chauf_1000W = 16,1 unités				
							Les matériaux et poids proviennent de Stelpro, <a href="http://www.stelpro.com/content/fr/pdf/fiches/8.pdf">http://www.stelpro.com/content/fr/pdf/fiches/8.pdf</a>
		P_Plinthe électrique de 1000W	1 p	Amount			Hypothèses :
		Reinforcing steel, at plant/RER U	M_acier = 4,54 kg		Undefined		Métal: 99 % du poids listé dans le catalogue de Stelpro
		Steel product manufacturing, average metal working/RER U	M_acier = 4,54 kg		Undefined		Peinture alkyl-1% du poids listé dans le catalogue Stelpro
		Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U	M_peinture = 0,051 kg		Undefined		Selon le rapport de Viran Uduman de l'U of British Colombia, la plinthe électrique est constituée de 90% acier et 10% aluminium
		Aluminium, production mix, at plant/RER U	M_alu = 0,505 kg		Undefined		
		Aluminium product manufacturing, average metal working/RER U	M_alu = 0,505 kg		Undefined		
		Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	0,5 kg		Undefined		Hypothèse: une boîte pèses 500g. Considéré recyclé à 100% (cut off)
		Paramètres locaux					
		M_plinthe	5,1				kg. Donnée Stelpro (plinthe 1000W)
		F_peinture	0,01				fraction du poids de la plinthe représenté par la peinture. Par hypothèse
		F_metal	0,99				fraction du poids de la plinthe représenté par le métal. Par hypothèse
		F_acier	0,9				fraction du métal composé d'acier. Par hypothèse
		F_alu	0,1				fraction du métal composé d'aluminium. Par hypothèse.
		M_alu	M_plinthe*F_metal*F_alu = 0,505 kg				
		M_acier	M_plinthe*F_metal*F_acier = 4,54 kg				
		M_peinture	M_Plinthe*F_peinture = 0,051 kg				
		I_Plinthes électriques	1 p	Amount			
		Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_ress_local*5,6 = 42,4 kgkm		Undefined		Transport de la plinthe et de son emballage
R1		Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011	1 kWh	Energy			Il s'agit de l'électricité consommée à la prise. Adapté de la donnée US de ecoinvent.
		Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	7,79E-09 kg	Lognormal	1,5		based on US (and Swiss) data
R1.1		Distribution network, electricity, low voltage/CH/I U	2,94E-07 km	Lognormal	2		approximation with Swiss data
R2		Electricity, medium voltage, at grid - Qc U, 2011	1,055 kWh	Lognormal	1,5		5,5% de pertes en ligne
		Emissions to air (low pop)					
		Heat, waste	0,0752 MJ	Lognormal	2		approximation with Swiss data
		Sulfur hexafluoride	7,79E-09 kg	Lognormal	1,5		based on US (and Swiss) data
		Emissions to soil					
		Heat, waste	0,226 MJ	Lognormal	2		approximation with Swiss data



R1.1 Distribution network, electricity, low voltage/CH/I U		1 km	Lenght	Proxy, Donnée suisse
Land	Occupation, industrial area, built up	44,6 m2a	Lognormal	2,37 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, from arable	0,826 m2	Lognormal	1,92 (5,5,4,1,1,5); estimates
Inputs	Transformation, from forest	0,659 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, built up	1,49 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
Inputs	Concrete, normal, at plant/CH U	1,48 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Lead, at regional storage/RER U	224 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road/RER U	1,92 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Preservative treatment, logs, pressure vessel/RER U	1,92 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Wood preservative, inorganic salt, containing Cr, at plant/RER U	34,2 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Copper, at regional storage/RER U	1880 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Light fuel oil, at regional storage/RER U	237 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Packaging film, LDPE, at plant/RER U	74,7 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Polyvinylchloride, at regional storage/RER U	617 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U	2300 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	0,0868 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	594 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Transport, freight, rail/RER U	3050 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Excavation, hydraulic digger/RER U	40,4 m3	Lognormal	1,38 (4,2,4,1,3,3); estimates
	Building, hall, steel construction/CH/I U	0,0557 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Building, multi-storey/RER/I U	2,17 m3	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Emissions to air			
	Sulfur hexafluoride	0,0017 kg	Lognormal	1,5 (1,1,1,1,1,na); statistics
	Emissions to soil			
	Chromium VI	4,04 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
Wastes and emissions to treatment	Copper	2,52 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	Boron	0,714 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	Fluoride	2,73 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	<b>Note: Les métaux sont considérés recyclés en fin de vie (approche cut off)</b>			
	Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH U	3260 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, wood pole, chrome preserved, 20% water, to municipal incineration/CH U	1040 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/CH U	74,7 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/CH U	617 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	237 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
R2 Electricity, medium voltage, at grid - Qc U, 2011		1 kWh	Energy	Québec
R2.1	Transmission network, electricity, medium voltage/CH/I U	3,24E-08 km	Lognormal	2 approximation with Swiss data
	Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	1,29E-07 kg	Lognormal	1,5 based on US (and Swiss) data
R3	Electricity, high voltage, at grid - Qc U, 2011	1,01 kWh	Lognormal	1,5 national statistics and approximation with Swiss data
	Emissions to air (low pop)			
Emissions to air	Heat, waste	0,0196 MJ	Lognormal	2 approximation with Swiss data
	Sulfur hexafluoride	1,29E-07 kg	Lognormal	1,5 based on US (and Swiss) data
Emissions to soil	Heat, waste	0,016 MJ	Lognormal	2 approximation with Swiss data
R2.1 Transmission network, electricity, medium voltage/CH/I U		1 km	Lenght	Proxy, Donnée suisse
Land	Occupation, industrial area, built up	111 m2a	Lognormal	2,37 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Occupation, industrial area, vegetation	22,1 m2a	Lognormal	2,37 (5,5,4,1,1,5); estimates
Inputs	Transformation, from arable	2,46 m2	Lognormal	1,92 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, from forest	1,96 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
Inputs	Transformation, to industrial area, built up	3,69 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, vegetation	0,735 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Aluminium, production mix, at plant/RER U	614 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Concrete, normal, at plant/CH U	3,51 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Lead, at regional storage/RER U	363 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road/RER U	2,71 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Preservative treatment, logs, pressure vessel/RER U	2,71 m3	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Wood preservative, inorganic salt, containing Cr, at plant/RER U	48,3 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Copper, at regional storage/RER U	2020 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Light fuel oil, at regional storage/RER U	313 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Packaging film, LDPE, at plant/RER U	45,4 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Polyvinylchloride, at regional storage/RER U	136 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U	1100 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	4,42 kg	Lognormal	1,21 (1,1,2,1,1,5); Swiss SFA study, 1999
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	774 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Transport, freight, rail/RER U	2600 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Excavation, hydraulic digger/RER U	245 m3	Lognormal	1,38 (4,2,4,1,3,3); estimates
	Building, hall, steel construction/CH/I U	0,158 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Building, multi-storey/RER/I U	6,13 m3	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
Emissions to air	Emissions to air			
	Sulfur hexafluoride	0,0867 kg	Lognormal	1,5 (1,1,1,1,1,na); statistics
	Emissions to soil			
	Chromium VI	5,7 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	Copper	3,56 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	Boron	1,01 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	Fluoride	3,86 kg	Lognormal	1,58 (3,3,2,1,1,5); information from LCA on wooden poles
	<b>Note: Les métaux sont considérés recyclés en fin de vie (approche cut off)</b>			
	Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH U	7720 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, wood pole, chrome preserved, 20% water, to municipal incineration/CH U	1460 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/CH U	45,4 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/CH U	136 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates

Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U		313 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
<b>R3</b>	<b>Electricity, high voltage, at grid - Qc U, 2011</b>	<b>1 kWh</b>	<b>Energy</b>	<b>Québec</b>
R3.1	Transmission network, electricity, high voltage/CH/I U	8,44E-09 km	Lognormal	2 approximation with Swiss data
R3.2	Transmission network, long-distance/UCTE/I U	3,17E-10 km	Lognormal	2 approximation with data from Europe
R4	Electricity mix - Qc U, 2011	1,01 kWh	Lognormal	1,5 national statistics and approximation with Swiss data
	Emissions to air (low pop.)			
	Heat, waste	0,0332 MJ	Lognormal	2 approximation with Swiss data
	Ozone	4,50E-06 kg	Lognormal	5 approximation with Swiss data
	Dinitrogen monoxide	5,00E-06 kg	Lognormal	5 approximation with Swiss data
	Emissions to soil			
	Heat, waste	0,00175 MJ	Lognormal	2 approximation with Swiss data
<b>R3.1</b>	<b>Transmission network, long-distance/UCTE/I U</b>	<b>1 km</b>	<b>Length</b>	<b>Proxy. Donnée issue de Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity</b>
	Land			
	Occupation, industrial area, built up	1200 m2a	Lognormal	1,94 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Occupation, industrial area, vegetation	6000 m2a	Lognormal	1,94 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Transformation, from arable	240 m2	Lognormal	2,38 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, built up	40 m2	Lognormal	2,38 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, vegetation	200 m2	Lognormal	2,38 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Inputs			
	Aluminium, production mix, at plant/RER U	6000 kg	Lognormal	1,69 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Concrete, normal, at plant/CH U	90,9 m3	Lognormal	1,69 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Copper, at regional storage/RER U	1000 kg	Lognormal	1,69 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U	1,60E+05 kg	Lognormal	1,69 (5,5,4,5,1,5); estimates
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	26,7 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Transport, freight, rail/RER U	33,4 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Wastes and emissions to treatment			<b>Note: Les métaux sont considérés recyclés en fin de vie (approche cut off)</b>
	Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH U	2,00E+05 kg	Lognormal	3,38 (5,5,4,5,1,5); estimates
<b>R3.2</b>	<b>Transmission network, electricity, high voltage/CH/I U</b>	<b>1 km</b>	<b>Length</b>	<b>Proxy. Donnée suisse</b>
	Land			
	Occupation, industrial area, built up	572 m2a	Lognormal	2,37 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Occupation, industrial area, vegetation	685 m2a	Lognormal	2,37 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, from arable	23,3 m2	Lognormal	1,92 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, from forest	18,6 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, built up	19,1 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Transformation, to industrial area, vegetation	22,8 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Inputs			
	Aluminium, production mix, at plant/RER U	3150 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Lead, at regional storage/RER U	134 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Copper, at regional storage/RER U	268 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Light fuel oil, at regional storage/RER U	66,9 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Packaging film, LDPE, at plant/RER U	66,9 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Polyvinylchloride, at regional storage/RER U	66,9 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	210 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U	7740 kg	Lognormal	1,33 (3,2,4,1,3,3); literature and estimations
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	590 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Transport, freight, rail/RER U	5710 tkm	Lognormal	2,09 (4,5,na,na,na,na); standard distances
	Excavation, hydraulic digger/RER U	57,8 m3	Lognormal	1,38 (4,2,4,1,3,3); estimates
	Building, hall, steel construction/CH/I U	0,181 m2	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Building, multi-storey/RER/I U	7,05 m3	Lognormal	1,68 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Wastes and emissions to treatment			<b>Note: Les métaux sont considérés recyclés en fin de vie (approche cut off)</b>
	Disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/CH U	66,9 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/CH U	66,9 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	66,9 kg	Lognormal	3,36 (5,5,4,1,1,5); estimates
<b>R4</b>	<b>Electricity mix - Qc U, 2011</b>	<b>1 kWh</b>	<b>Energy</b>	<b>Production, achats + import. Tiré de HYDRO-QUÉBEC (2011). Faits sur l'électricité d'Hydro-Québec : Approvisionnements énergétiques et émissions atmosphériques, 2011. En ligne : <a href="http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/themes/docs/etiquette_francais_2011.pdf">http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/themes/docs/etiquette_francais_2011.pdf</a> Note: la production électrique à partir de biogaz et de déchets a été négligée (par manque de données générique pour les représenter et du fait qu'elle compte pour moins de 0,1%). La production d'hydroélectricité a été augmentée d'autant pour donner 100% au total.</b>
	Electricity, hydropower, at run-of-river power plant/CH U	0,3081 kWh		Production HQ. Quantité ajustée pour donner un total de 100% (vu l'exclusion des déchets et du biogaz)
	Electricity, hydropower, at reservoir power plant, alpine region/RER U	0,4900 kWh		Production HQ. Quantité ajustée pour donner un total de 100% (vu l'exclusion des déchets et du biogaz)
	Electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/DE U	0,0237 kWh		Nucléaire
	Electricity, oil, at power plant/DE U	0,0002 kWh		Mazout
	Electricity, at wind power plant 800kW/RER U	0,0074 kWh		Éolien
	Electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/RER U	0,1375 kWh		Achats des Churcill Falls
	Electricity, hydropower, at run-of-river power plant/RER U	0,0023 kWh		Achats
	Electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/RER U	0,0203 kWh		Achats
	Electricity, hard coal, at power plant/HR U	0,0035 kWh		Charbon
	Electricity, industrial gas, at power plant/BE U	0,0019 kWh		Gaz
	Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation energy/CH U	0,0051 kWh		Biomasse
				<b>1000W permet de chauffer une pièce de 100 p² selon RONA (Source : <a href="http://www.rona.ca/contenu/installer-plinthe-electrique_chauffage_chauffage-ventilation-climatisation_renovation">http://www.rona.ca/contenu/installer-plinthe-electrique_chauffage_chauffage-ventilation-climatisation_renovation</a>) Les matériaux et poids proviennent de Stelpro, <a href="http://www.stelpro.com/contenu/fr/pdf/fiches/B.pdf">http://www.stelpro.com/contenu/fr/pdf/fiches/B.pdf</a> Hypothèses : Métal: 99 % du poids listé dans le catalogue de Stelpro Peinture alkyd- 1% du poids listé dans le catalogue Stelpro</b>
<b>Fabrication d'une plinthe électrique d'acier (alkyd paint) de 1000W</b>		<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	
	Reinforcing steel, at plant/RER U	M_acier = 4,54 kg	Undefined	
	Steel product manufacturing, average metal working/RER U	M_acier = 4,54 kg	Undefined	

Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U	M_peinture = 0,051 kg	Undefined	Selon le rapport de Viran Uduman de l'U of British Colombia, la plinthe électrique est constituée de 90% acier et 10% aluminium
Aluminium, production mix, at plant/RER U	M_alu = 0,505 kg	Undefined	
Aluminium product manufacturing, average metal working/RER U	M_alu = 0,505 kg	Undefined	
Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	0,5 kg	Undefined	Hypothèse: une boîte pèses 500g
<i>Paramètres locaux</i>			
M_plinthe	5,1		kg. Donnée Steipro (plinthe 1000W)
F_peinture	0,01		fraction du poids de la plinthe représenté par la peinture. Par hypothèse
F_metal	0,99		fraction du poids de la plinthe représenté par le métal. Par hypothèse
F_acier	0,9		fraction du métal composé d'acier. Par hypothèse
F_alu	0,1		fraction du métal composé d'aluminium. Par hypothèse.
M_alu	M_plinthe*F_metal*F_alu = 0,505 kg		
M_acier	M_plinthe*F_metal*F_acier = 4,54 kg		
M_peinture	M_Plinthe*F_peinture = 0,051 kg		

## 1A. Géothermie liquide-eau

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité		Commentaires /hypothèses / Référence	
1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution)			1 MJ	Energy			
	P10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé	1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Phase Production			
	P22_Pompe à chaleur eau-eau	1/(yield_geothermie*LifeSpan_pompe_geothermie) = 6,94E-7 p		Phase Production			
	P32_Planchers radiants - distribution de la chaleur	1/(yield_geothermie*LifeSpan_plancher_radiant)*PourcentMjthGeo_toAir = 2,64E-7 p		Phase Production			
	P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons	1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMjthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Phase Production			
	I00_Système boucle-pompe	1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Phase distribution - Installation			
	I32_Planchers radiants	1/(yield_geothermie*LifeSpan_plancher_radiant)*PourcentMjthGeo_toAir = 2,64E-7 p		Phase distribution - Installation			
	I40_Réservoir à eau chaude	1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMjthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Phase distribution - Installation			
	E02_Système géothermique eau-eau	1 MJ		Phase Exploitation			
	G02_Pompe à chaleur eau-eau	1/(yield_geothermie*LifeSpan_pompe_geothermie) = 6,94E-7 p		Gestion en fin de vie			
	G10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé_obturation	1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Gestion en fin de vie			
	G32_Planchers radiants	1/(yield_geothermie*LifeSpan_plancher_radiant)*PourcentMjthGeo_toAir = 2,64E-7 p		Gestion en fin de vie			
	G40_Réservoir à eau chaude	1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMjthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Gestion en fin de vie			
No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD <sup>2</sup>	Commentaires /hypothèses / Référence
P10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé			1 p	Amount			Adaptation de Borehole heat exchanger 150 m/CH/I U
	Bentonite, at processing/DE U		330 kg	Lognormal		2,06	changé depuis 8 kg: la données assumait que la bentonite provenait de source recyclée
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		330*0,001*2600 = 858 tkm	Undefined			Transport Bentonite depuis l'État du Wyoming, USA (2550km de Mtl)
	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U		176 kg	Lognormal		2,06	Changé de LDPE (Donnée Boréale)
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		176*0,001*T_ress_local = 88 tkm	Undefined			Peut-être manufacturé au QC (rayon de 500km estimé)
	Methanol, at plant/GLO U		102 kg	Undefined			Donnée originale: éthylène glycol. Au Québec, l'antigel le plus utilisé dans les systèmes résidentiels est le méthanol. Sources: Puitsiers du Qc : Veilleux (2013) et Massé (2013)
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		102*0,001*T_ress_local = 51 tkm	Undefined			Transport Méthanol depuis le Québec
	Sand, at mine/CH U		33 kg	Lognormal		2,06	donnée originale: 33 kg de ciment
	Changé de Cement, unspecified, at plant/CH U (au Qc le sable classe A est plus souvent utilisé)						
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		33*0,001*T_ress_local = 16,5 tkm	Undefined			Transport du sable, depuis le Québec.
P22_Pompe à chaleur eau-eau			1 p	Amount			Adapté de Heat pump, brine-water, 10kW/CH/I U
	Water, completely softened, at plant/RER U		0,708 m3	Lognormal		2,06	Modifié de "unspecified origin". Source: Fontaine (2013).
	Cast iron, at plant/RER U		3,6 kg	Undefined			Circulateur d'eau TACO 005-F2
	Electricity, medium voltage, at grid - Am N U		140 kWh	Lognormal		1,55	
	Tube insulation, elastomere, at plant/DE U		10 kg	Lognormal		2,06	
	Refrigerant R134a, at plant/RER U		3,09 kg	Lognormal		1,7	Proxy pour HFC-410a. Quantité de réfrigérant initialement injecté dans la boucle interne.
	Copper, at regional storage/RER U		22 kg	Lognormal		2,06	
	Polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant/RER U		1 kg	Lognormal		2,06	
	Steel, low-alloyed, at plant/RER U		20 kg	Lognormal		2,06	
	Reinforcing steel, at plant/RER U		75 kg	Lognormal		2,06	
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		0,1347*T_ress_region = 202 tkm	Undefined			Poids total des matériaux = 134,7 kg. En provenance du Canada (1500km)
	Lubricating oil, at plant/RER U		1,7 kg	Lognormal		1,55	
	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U		1400 MJ	Lognormal		1,55	
	Emissions to air (high. Pop)						
	Heat, waste		504 MJ	Lognormal		2,06	Donnée originale: 0,69 kg, i.e. 23% de la qté de remplissage (i.e. 3,09 kg); Adaptée car, de ce 23%, 3% fuit lors de la production (0,0927) et 20% fuit lors de la fin de vie (0,618);
	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a		0,0927 kg	Undefined			
P32_Planchers radiants - distribution de la chaleur			1 p	Amount			Importé depuis le système géothermique : pour 150 m <sup>3</sup> , durée de vie = 50 ans
	Water, completely softened, at plant/RER U		0,45 m3	Lognormal		2,06	Modifié de "unspecified origin". Source: Fontaine (2013).
	Aluminium, production mix, at plant/RER U		126 kg	Lognormal		2,06	
	Polyethylene, LDPE, granulate, at plant/RER U		101 kg	Lognormal		2,06	
	Polystyrene, high impact, HIPS, at plant/RER U		66 kg	Lognormal		2,06	
	Sand, at mine/CH U		4650 kg	Lognormal		2,06	
	Cement, unspecified, at plant/CH U		900 kg	Lognormal		2,06	
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_ress_local*(126+101+66+4650+900)*0,001 = 2,92E3 tkm	Undefined			
							Adapté de Hot water tank 600l, at plant/CH/I U (hypothèse: production québécoise)
							Tous les flux ont été multipliés par 0.3 pour ramener le volume et le poids à un réservoir de 200l (40 à 60 gallons).
P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons			1 p	Amount			
	Electricity, medium voltage, at grid - Am N U		69,4*FM_ChauffeEau = 20,8 kWh	Undefined			Total de l'énergie requise. Hypothèse: Produit en Am. du N.
	Electricity, PV, at 3kWp slanted-roof, multi-Si, panel, mounted/CH U		0 kWh	Lognormal		1,24	ramené à 0 et ajouté à l'électricité totale.
	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH U		266*FM_ChauffeEau = 79,8 MJ	Undefined			Changé de Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U
	Wood chips, from forest, softwood, burned in furnace 300kW/CH U		0 MJ	Lognormal		1,24	ramené à 0 et ajouté à la combustion de light fuel oil
	Hot water tank factory/CH/I U		2,0E-5*FM_ChauffeEau = 6E-6 p	Undefined			
	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U		1*FM_ChauffeEau = 0,3 kg	Undefined			
	Glass wool mat, at plant/CH U		20*FM_ChauffeEau = 6 kg	Undefined			
	Polyvinylchloride, at regional storage/RER U		2*FM_ChauffeEau = 0,6 kg	Undefined			
	Chromium steel 18/8, at plant/RER U		40*FM_ChauffeEau = 12 kg	Undefined			
	Steel, low-alloyed, at plant/RER U		220*FM_ChauffeEau = 66 kg	Undefined			
	Welding, gas, steel/RER U		7,72*FM_ChauffeEau = 2,32 m	Undefined			
	Sawn timber, softwood, planed, air dried, at plant/RER U		0,0222*FM_ChauffeEau = 0,00666 m3	Undefined			
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		0,283*1500*FM_ChauffeEau = 127 tkm	Undefined			283 kg selon le rapport ecoinvent (table 5.6)
	Emissions to air (high. Pop)						
	Heat, waste		250*FM_ChauffeEau = 75 MJ	Undefined			
I00_Système boucle-pompe			1 p	Amount			
	Tap water, at user/RER U		10000 kg	Undefined			10 m3 pour démarrer la pompe. Modifié de "Water, unspecified natural origin/m3"
	Reinforcing steel, at plant/RER U		33 kg	Lognormal		2,06	Usure des mèches et parties métalliques.
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		0,033*T_ress_region = 49,5 tkm	Undefined			Hypothèse: ressource régionale, i.e. du Canada ou des ÉU i.e. 1500 km
	Diesel, burned in building machine/GLO U		1700 MJ	Undefined			Déplacé de Borehole heat exchanger 150 m/CH/I U

Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U	13 tkm	Undefined		Poids total de la pompe = 130 kg, sur 100 km jusqu'à la résidence
Waste and emission to treatment	250*T_waste = 1,25E4 kgkm	Undefined		Transport des déchets de forage.
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	250 kg	Lognormal	2,06	Waste from drilling process - Déplacé de Borehole heat exchanger 150 m/CH/I U
<b>I32_Planchers radiants</b>				
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_ress_local*(126+101+66+4650+900)*0,001 = 2,92E3 tkm	Undefined		
<b>I40_Réservoir à eau chaude</b>				
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_ress_local*0,283*FM_ChauffageEau = 42,4 tkm	Undefined		
<b>E02_Système géothermique eau-eau</b>				
Energy, geothermal, converted	0,744 MJ	<b>Energy</b>		<b>Adapté de Heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW/RER U</b>
Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011	(1/COPeau)/3,6 = 0,0712 kWh			Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998
Refrigerant R134a, at plant/RER U	2,50E-06 kg			Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998
Transport, passenger car, petrol, EUROS/CH U	T_maintenance/(Frequence_entretien*Yield_geothermie) = 6,94-5 personkm			Proxy pour HFC-410a. Quantité de réfrigérant rajouté en cours de durée de vie, pour remplacer les émissions fugitives du système.
Emissions to air (high. Pop)				Entretien des conduites (à chaque 10 ans)
Heat, waste	1 MJ			
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	2,50E-06 kg			Proxy pour HFC-410a. Correspond aux émissions fugitives pendant l'utilisation (estimées à 9 kg sur les 50 réfrigérant R410A, constitué à 50% R32, 50% R125 ( <a href="http://www.ableairinc.com/html/r22___r410.html">http://www.ableairinc.com/html/r22___r410.html</a> ))
Ethane, pentafluoro-, HFC-125	Nb_climatiseurs*0,8*5* pertes_refrigerant = 0,048 kg			
Methane, difluoro-, HFC-32	Nb_climatiseurs*0,8*5* pertes_refrigerant = 0,048 kg			
<u>Paramètres locaux</u>				
Frequence_entretien	1,00E+01 ans			
<b>G02_Pompe à chaleur eau-eau</b>				
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	11*T_waste = 550 kgkm	Undefined	0	<b>Adapté de Heat pump, brine-water, 10kW/CH/I U. Les composantes métalliques sont considérées recyclées (cut off). Seul leur transport est inclus.</b>
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	(3,6+22+20+75)*T_waste = 6,03E3 kgkm	Undefined		Transport des matières plastiques vers enfouissement
Emissions to air (high. Pop)				Transport des composantes métalliques vers recycleur
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0,618 kg	Undefined		Proportion des émission à l'air de HFC134a (Proxy pour HFC-410a) ayant lieu en fin de vie de la pompe (Heat pump, brine-water). Le reste du réfrigérant est considéré récupéré (cut off).
Waste and emission to treatment				
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U	11 kg	Undefined	0	copiée de production de la pompe à chaleur; changé car les déchets de plastique ne sont pas incinérés au Qc
<b>G10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé obturation</b>				
<b>Les boucles souterraines de plastique (HDPE) sont laissées en place et considérées sans impact</b>				
Emissions to soil				
Methanol	102 kg	Lognormal	2,06	Le liquide est laissé dans la boucle. Source: Veilleux (2013) et Massé (2013). Hyp: éventuellement, il sera libéré dans le sol.
<b>G32_Planchers radiants</b>				
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*(5,73+0,167) = 295 tkm	Undefined		<i>Note: il s'agit d'un pire cas où le plancher au complet est défait et envoyé à l'enfouissement. Dans les faits, un propriétaire ne souhaitant plus opérer un plancher radiant pourrait simplement couper les tuyaux de surface et laisser en place la dalle de béton et la tubulure dans le plancher.</i>
Waste and emission to treatment				
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5730 kg	Lognormal	2,06	
Disposal, polyethylene, 0.4% water, to sanitary landfill/CH U	167 kg	Lognormal	2,06	Fin de vie au Qc. Incinération remplacée par l'enfouissement.
<b>G40_Réservoir à eau chaude</b>				
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*(0,3+6+0,6+12+66)*FM_ChauffageEau = 0,388 kgkm	Undefined		<b>Adapté de Hot water tank 600l, at plant/CH/I U (hypothèse: production québécoise)</b>
Waste and emission to treatment				<b>Tous les flux ont été multipliés par 0.3 pour ramener le volume et le poids à un réservoir de 200l (40 à 60 gallons). Le métal est considéré recyclé (cut off). Seul son transport est inclus.</b>
Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH U	20*FM_ChauffageEau = 6 kg	Undefined	0	Tranport des matières non récupérables vers l'enfouissement et transport des composantes métalliques vers recycleurs.
Disposal, polypropylene, 15.9% water, to sanitary landfill/CH U	3,86*FM_ChauffageEau = 1,16 kg	Undefined	0	Modifié pour retirer le transport (éviter double comptage)
Disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to sanitary landfill/CH U	2*FM_ChauffageEau = 0,6 kg	Undefined	0	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2/CH U	0,617*FM_ChauffageEau = 0,185 m3	Undefined	0	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)

## 1B. Géothermie liquide-air

				2.77778E-07		
No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires /hypothèses / Référence	
<b>1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution)</b>			<b>1 MJ</b>	<b>Energy</b>		
	P10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé		1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Phase Production	
	P21_Pompe à chaleur eau-air (climatisation directe)		1/(yield_geothermie*LifeSpan_pompe_geothermie) = 6,94E-7 p		Phase Production	
	P31_Système de ventilation à air pulsée		1/(yield_geothermie*LifeSpan_systVent)*PourcentMJthGeo_toAir = 2,64E-7 p		Phase Production	
	P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons		1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMJthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Phase Production	
	I31_Système de ventilation à air pulsé		1/(yield_geothermie*LifeSpan_systVent) = 2,78E-7 p		Phase distribution - Installation	
	I00_Système boucle-pompe *modifié		1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Phase distribution - Installation	
	I40_Réservoir à eau chaude		1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMJthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Phase distribution - Installation	
	E01_Système géothermique eau-air (climatisation directe)		1 MJ		Phase Exploitation	
	G10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé_obturation		1/(yield_geothermie*LifeSpan_boucle_geothermie) = 2,78E-7 p		Gestion en fin de vie	
	G01_Pompe à chaleur eau-air		1/(yield_geothermie*LifeSpan_pompe_geothermie) = 6,94E-7 p		Gestion en fin de vie	
	G31_Système de ventilation à air pulsé		1/(yield_geothermie*LifeSpan_systVent)*PourcentMJthGeo_toAir = 2,64E-7 p		Gestion en fin de vie	
	G40_Réservoir à eau chaude		1/(yield_geothermie*LifeSpan_chauffe_eau)*PourcentMJthGeo_toEau = 5,79E-8 p		Gestion en fin de vie	

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD <sup>2</sup>	Commentaires /hypothèses / Référence
	<b>P10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		

Voir onblet 1A.

	<b>P21_Pompe à chaleur eau-air (climatisation directe)</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		Identique à la pompe eau-eau sauf que l'échangeur de chaleur coaxial est remplacé par un serpent à air (que l'on considère ici comme équivalent en terme de matériaux utilisés).
	Identique au processus "P22_Pompe à chaleur eau-eau". Voir onblet 1A.						

	<b>P31_Système de ventilation à air pulsée (sans les remplacements de pièces et la maintenance)</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		Adapté de Ventilation system, decentralized, 6 x 120 m3/h, steel ducts, without GHE/CH/I Pour toutes les entrées où c'était approprié, la quantité du flux économique a été divisée par 6 pour ramener le système à une unité d'habitation de 130 m2 (120 m3/h).
	Supply air inlet, steel/SS, DN 75, at plant/RER U		30/6 = 5 p		Undefined		
	Exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125, at plant/CH U		18/6 = 3 p		Undefined		
	Air distribution housing, steel, 120 m3/h, at plant/CH U		12/6 = 2 p		Undefined		
	Overflow element, steel, approx. 40 m3/h, at plant/RER U		18/6 = 3 p		Undefined		
	Spiral-seam duct, steel, DN 125, at plant/RER U		12/6 = 2 m		Undefined		
	Ventilation duct, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		600/6 = 100 m		Undefined		
	Elbow 90°, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		228/6 = 38 p		Undefined		
	Connection piece, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		150/6 = 25 p		Undefined		
	Flexible duct, aluminum/PET, DN of 125, at plant/RER U		20/6 = 3,33 m		Undefined		
	Silencer, steel, DN 125, at plant/CH U		24/6 = 4 p		Undefined		
	Air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h, at plant/RER U		12/6 = 2 p		Undefined		
	Air filter, in exhaust air valve, at plant/RER U		18/6 = 3 p		Undefined		
	Sealing tape, aluminum/PE, 50 mm wide, at plant/RER U		700/6 = 117 m		Undefined		
	Control and wiring, decentralized unit, at plant/RER U		6/6 = 1 p		Undefined		
	Ventilation equipment, decentralized, 180-250 m3/h, at plant/RER U		6/6*lifespansystVent/lifespansystVentilo = 2,5 p		Undefined		
	Exhaust air outlet, steel/aluminum, 85x365 mm, at plant/CH U		12/6 = 2 p		Undefined		
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		0,047*T_ress_local = 23,5 tkm		Undefined		47 kg = moyenne des systèmes 120 m3/h p.11 (ecoinvent # 25) Donnée originale = 331

	<b>P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		
	Voir onblet 1A.						

	<b>I00_Système boucle-pompe</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		
	Voir onblet 1A.						

	<b>I31_Système de ventilation à air pulsé</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		0,047*T_ress_local = 23,5 tkm		Undefined		47 kg = moyenne des systèmes 120 m3/h p.11 (ecoinvent # 25) Donnée originale = 331

	<b>I40_Réservoir à eau chaude</b>		<b>1 p</b>		<b>Amount</b>		
	Voir onblet 1A.						

	<b>E01_Système géothermique eau-air</b>		<b>1 MJ</b>	<b>Energy</b>		<b>Adapté de heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW/MJ/RER</b>
	Energy, geothermal, converted		0,744 MJ			Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; Hyp: applicable au contexte du sous-sol québécois (55 W/m)
						Énergie pour la pompe à chaleur (compresseur + ventilateur + circulateur); Ajustement du COP = 3.9 pour eau-eau à 3.5 pour eau-air 1/3.5 = 0.2857 MJ in/MJ out = 0.0794 kWh in/MJ out Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998 Énergie pour le ventilateur incluse dans l'énergie de la pompe à chaleur (0,44 W par m3/h de débit; 3 bouches à 170 m3/h chacune = 510 m3/h; 224.4 W pendant 2000h/a = 448,8 kWh/a; rendement thermopompe = 72000MJ/a: 6,23E-3 kWh/MJ).
	Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011		1/(COPair*3,6) = 0,0794 kWh		Undefined	Durée de vie estimée du ventilateur: 20 ans Proxy pour HFC-410a. Quantité de réfrigérant rajouté en cours de durée de vie, pour remplacer les émissions fugitives du système.
	Refrigerant R134a, at plant/RER U		2,50E-06 kg		Undefined	Remplacer les émissions fugitives du système.
	Air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h, at plant/RER U		Nb_filtres/(Yield_geothermie*lifespans_filtres) = 2,08E-5 p		Undefined	Filtres à air de remplacement (3 filtres remplacés aux 2 ans)

Transport, passenger car, petrol, EUROS/CH U	T_maintenance/(Frequence_entretien*Yield_geothermie) = 6,94-5 personkm	Undefined	Entretien des conduites (à chaque 10 ans)
Emissions to air (high. Pop)			
Heat, waste	1 MJ	Undefined	
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	2,50E-06 kg	Undefined	Proxy pour HFC-410a. Correspond aux émissions fugitives pendant l'utilisation (estimées à 9 kg sur les 50 ans de vie du système : donnée générique ecoinvent)
Waste and emission to treatment			
Disposal, air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h/CH U	Nb_filtres/(Yield_geothermie*lifespan_filtres) = 2,08E-5 p	Undefined	
<u>Paramètres locaux</u>			
Frequence_entretien	10		ans
Nb_filtres	3		unités
LifeSpan_filtres	2		ans
Trp_entretien	50		km. Distance aller retour parcourue par le technicien
<b>G01_Pompe à chaleur eau-air</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	
<i>Identifique au Système liquide-eau. Voir processus "G02_Pompe à chaleur eau-eau" à l'onglet 1A</i>			
<b>G10_Boucle souterraine verticale en circuit fermé_obturation</b>			
<i>Voir onblet 1A.</i>			
<b>G31_Système de ventilation à air pulsé</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Adapté de Ventilation system, decentralized, 6 x 120 m3/h, steel ducts, without GHE/CH</b> <b>Les processus de traitement des rejets ont été modifiés pour remplacer l'incinération par l'enfouissement (fin de vie au Québec)</b>
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*0,047*0 = 0 tkm	Undefined	47 kg = moyenne des systèmes 120 m3/h p.11 (ecoinvent # 25). Le transport est enlevé pour éviter le double comptage, car les processus de traitement des rejets incluent du transport.
Waste and emission to treatment			
Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant/CH U	1110/6 = 185 kg	Undefined	
Disposal, exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125/CH U	18/6 = 3 p	Undefined	
Disposal, air distribution housing, steel, 120 m3/h/CH U	12/6 = 2 p	Undefined	
Disposal, overflow element, steel, approx. 40 m3/h/CH U	18/6 = 3 p	Undefined	
Disposal, flexible duct, aluminum/PET, DN of 125/CH U	20/6 = 3,33 m	Undefined	
Disposal, silencer, steel, DN 125/CH U	24/6 = 4 p	Undefined	
Disposal, air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h/CH U	12/6 = 2 p	Undefined	
Disposal, air filter, in exhaust air valve/CH U	18/6 = 3 p	Undefined	
Disposal, sealing tape, aluminum/PE, 50 mm wide/CH U	700/6 = 117 m	Undefined	
Disposal, control and wiring, decentralized unit/CH U	6/6 = 1 p	Undefined	Gestion en fin de vie non modifiée (tel quel ecoinvent) car la gestion au Québec n'est pas connue
Disposal, ventilation equipment, decentralized, 180-250 m3/h/CH U	6/6 = 1 p	Undefined	
<b>G40_Réservoir à eau chaude</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	
<i>Voir onblet 1A.</i>			

## 2A. Solaire thermique à collecteurs plats

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires /hypothèses / Référence		
<b>2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contri</b>			<b>1 MJ</b>	<b>Energy</b>	<b>Valeurs tirées de "Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water" pour une unité, ramené /MJ, sauf réservoir à eau-chaude de 600l, remplacé par 2 réservoirs de 60 gal (plus représentatif des technologies vendues au Qc)</b> <b>Aucune perte présumée.</b> Correspond aux 2 réservoirs : 1) pour emmagasiner l'eau préchauffée et 2) avec élément chauffant électrique standard.		
	P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons	(2*LifeSpan_FlatPlate/LifeSpan_chauffe_eau/LifeSpanOutput_FlatPlate)=1,43E-5 p		Phase Production			
	P211_Collecteur solaire plat	Nbr_m2_CollPlats*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 2,06E-5 m2		Phase Production			
	P220_Pompe à eau 40W	LifeSpan_FlatPlate/LifeSpan_pompe_solaire*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 8,59E-6 p		Phase Production			
	P230_Réservoir d'expansion	1*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 3,44E-6 p		Phase Production	même durée de vie que le système		
	I201_Système solaire termique (collecteurs plats)	1*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 3,44E-6 p		Phase distribution - Installation			
	E21_Système solaire thermique (eau chaude) à collect	1 MJ		Phase Exploitation			
	G40_Réservoir à eau chaude	(2*LifeSpan_FlatPlate/LifeSpan_chauffe_eau/LifeSpanOutput_FlatPlate)=1,43E-5 p		Gestion en fin de vie			
	G211_Collecteur solaire plat (prod eau chaude)	Nbr_m2_CollPlats*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 2,06E-5 m2		Gestion en fin de vie			
	G220_Pompe à eau 40W	LifeSpan_FlatPlate/LifeSpan_pompe_solaire*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 8,59E-6 p		Gestion en fin de vie			
	G230_Réservoir d'expansion	1*(1/LifeSpanOutput_FlatPlate) = 3,44E-6 p		Gestion en fin de vie	même durée de vie que le système		

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD²	Min	Commentaires /hypothèses / Référence
<b>P40_Réservoir à eau chaude, 60 gallons</b>			<b>1 p</b>	<b>Amount</b>				<b>Adapté de Hot water tank 600l, at plant/CH/I U (hypothèse: production québécoise)</b> <b>Tous les flux ont été multiplié par 0.3 pour ramener le volume et le poids à un réservoir de 200l (40 à 60 gallon). Ref. Table 5.7 rapport ecoinvent 06 (solar heat)</b>
<i>Voir onblet 1A.</i>								

<b>P211_Collecteur solaire plat</b>			<b>1 m2</b>	<b>Area</b>	<b>Adapté de Flat plate collector, at plant/CH/I U SWITZERLAND</b>			
	Electricity, medium voltage, at grid/US U	1,16 kWh		Lognormal	1,4			Fabrication présumée aux USA
	Tap water, at user/RER U	9,4 kg		Lognormal	1,4			(2,5,1,1,3,5); Questionnaire
	Water, completely softened, at plant/RER U	1,38 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,3,5); Questionnaire (eau de production)
	Solar collector factory/RER/I U	2,00E-07 p		Lognormal	3,1			Liquide caloporteur, fraction d'eau (60%)
	Rock wool, packed, at plant/CH U	2,43 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,3,5); Questionnaire
	Corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/CH	3,68 kg		Lognormal	1,2			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Solar glass, low-iron, at regional storage/RER U	9,12 kg		Lognormal	1,3			(3,4,3,1,1,3); Company information, packaging
	Synthetic rubber, at plant/RER U	0,732 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Silicone product, at plant/RER U	0,0588 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Propylene glycol, liquid, at plant/RER U	1,01 kg		Lognormal	1,3			Liquide caloporteur, antigel (40% dans de l'eau déminéralisée)
	Aluminium, production mix, wrought alloy, at plant/RER	3,93 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Brazing solder, cadmium free, at plant/RER U	0,00368 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Soft solder, Sn97Cu3, at plant/RER U	0,0588 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Copper, at regional storage/RER U	2,82 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Chromium steel 18/8, at plant/RER U	4,14 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire, fixing parts
	Selective coating, copper sheet, black chrome/RER U	1 m2		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Anti-reflex-coating, etching, solar glass/DK U	1 m2		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Sheet rolling, copper/RER U	2,82 kg		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	Masse_tot*TT_ress_region = 4,41E4 kgkm		Undefined				Hypothès: provient des USA
	Emissions to air (high. Pop)							
	Heat, waste	4,16 MJ		Lognormal	1,3			(2,5,1,1,1,5); Questionnaire

Paramètres locaux

Masse_tot	29,36328 kg	Masse totale des composantes à transporter						
-----------	-------------	--	--	--	--	--	--	--

<b>P220_Pompe à eau 40W</b>			<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Adapté de Pump 40W, at plant/CH/I U, SWITZERLAND</b>			
	Copper, at regional storage/RER U	0,25 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Polyvinylchloride, at regional storage/RER U	0,03 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Synthetic rubber, at plant/RER U	0,007 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Aluminium, production mix, wrought alloy, at plant/RER	0,02 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Cast iron, at plant/RER U	1,2 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Chromium steel 18/8, at plant/RER U	0,92 kg		Lognormal	1,33			(2,5,3,1,1,5); Own measurement
	Hot water tank factory/CH/I U	2,00E-07 p		Lognormal	4,01			(5,5,3,1,5,5); Rough estimation
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	0,00242*TT_ress_region = 3,63 tkm		Undefined				

<b>P230_Réservoir d'expansion</b>			<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Adapté de Expansion vessel 25l, at plant/CH/I U SWITZERLAND</b>			
	Electricity, medium voltage, at grid - Am N U	8,61 kWh		Lognormal	1,24			Hypothèse: Produit au Can ou aux USA.
	Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-n	20 MJ		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U	0,07 kg		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/CH	0,5 kg		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Polypropylene, granulate, at plant/RER U	0,025 kg		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Butyl acrylate, at plant/RER U	0,7 kg		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	4,7 kg		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Hot water tank factory/CH/I U	4,00E-07 p		Lognormal	2,34			(5,5,3,1,5,5); Rough estimation
	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	6 tkm		Undefined				
	Welding, gas, steel/RER U	0,5 m		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire
	Emissions to air (high. Pop)							
	Heat, waste	31 MJ		Lognormal	1,24			(2,1,3,1,1,5); Questionnaire

<b>I201_Système solaire termique (collecteurs plats)</b>			<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Adapté de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I U</b>			
	Tube insulation, elastomere, at plant/DE U	Nbr_m2_CollPlats kg		Undefined				HYP: la qté de tuyauterie nécessaire est linéaire en fonction de la surface des panneaux.
	Copper, at regional storage/RER U	2*Nbr_m2_CollPlats kg		Undefined				
	Drawing of pipes, steel/RER U	2*Nbr_m2_CollPlats kg		Undefined				
	Transport, van <3.5t/RER U	T_ress_local*(1+2+2+M_tot)*Nbr_m2_CollPlats = 1,03E5 kgkm		Undefined				Poid total du sys (y compris les matériaux de tuyauterie)



# Paramètres locaux

Masse_tot		29,36328 kg	Masse totale des composantes du panneau (voir P_211)		
E21_Système solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats		1 MJ	Adapté de Heat, at flat plate collector, one-family house, for hot water/CH U SWITZERLAND et de Flat plate collector, at plant/CH/I U SWITZERLAND (pour le remplacement du liquide caloporteur)		
Energy, solar, converted		1,124 MJ	Lognormal	1,0714	(2,na,1,1,1,na); Includes losses in the system
Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011		0,016713 kWh	Lognormal	1,0714	Utilisé au Qc
Water, completely softened, at plant/RER U		M_eau_demin = 5,69E-5 kg	Undefined		(2,na,1,1,1,na); Simulation
Propylene glycol, liquid, at plant/RER U		M_antigel = 4,16E-5 kg	Undefined		Adapté de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I U
Transport, van <3.5t/CH U		T_ress_local*(M_eau_demin+M_antigel) = 0,0493 kgkm	Undefined		La quantité initiale contenue dans 1 m² de panneau (1,38 kg) est remplacée 2 fois dans la durée de vie totale du système.
Transport, passenger car, petrol, EURO5/CH U		T_maintenance*Nbre_chgmt_liq_cal/LifeSpanOutput_FlatPlate = 0,000344 personkm	Undefined		Adapté de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I U
Emissions to air (high. Pop)					La quantité initiale contenue dans 1 m² de panneau (1,01 kg) est remplacée 2 fois dans la durée de vie totale du système.
Heat, waste		1,1842 MJ	Lognormal	1,0714	(2,na,1,1,1,na); Simulation and solar energy
Waste and emission to treatment					
Treatment, heat carrier liquid, 40% C3H8O2, to waste		2,39e-3*Nbr_m2_CollPlats*nbre_entretiens/LifeSpanOutput_FlatPlate = 9,85E-8 m3	Undefined		.Quantité de fluide caloporteur rejetée lors de l'entretien (remplacements)
					Tiré de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I
Paramètres locaux					
Nbre_chgmt_liq_cal		2 fois			Considérant un remplacement aux 10 ans approximativement
M_eau_demin		1,38*Nbr_m2_CollPlats*Nbre_chgmt_liq_cal/LifeSpanOutput_FlatPlate = 5,69E-5 kg			
M_antigel		1,01*Nbr_m2_CollPlats*Nbre_chgmt_liq_cal/LifeSpanOutput_FlatPlate = 4,16E-5 kg			
G211_Collecteur solaire plat (prod eau chaude)		1 m2	Area		Importé de P211
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*0,00368 = 0,184 tkm	Undefined		Transport verre, plastique, laine minérale vers enfouissement
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*(3,93+2,82+4,14) = 544 kgkm	Undefined		Transport des métaux vers recycleurs
Waste and emission to treatment					
Disposal, glass, 0% water, to inert material landfill/CH		9,12 kg	Lognormal	1,3	Sotring plant remplacé par enfouissement (Qc)
Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material lan		2,43 kg	Lognormal	1,3	Sotring plant remplacé par enfouissement (Qc)
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary lai		0,79 kg	Lognormal	1,3	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanita		3,68 kg	Lognormal	1,3	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Treatment, sewage, from residence, to wastewater tre		0,0094 m3	Lognormal	1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
					Quantité de fluide caloporteur rejetée en fin de vie du système.
Treatment, heat carrier liquid, 40% C3H8O2, to waste		0,00239 m3	Lognormal	1,3	Tiré de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I
G220_Pompe à eau 40W		1 p	Amount		Importé de P220
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*0,000037 = 0,00185 tkm	Undefined		Transport PVC et caoutchouc vers enfouissement
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*(0,02+1,2+0,92) = 107 kgkm	Undefined		Transport des métaux vers recycleurs
Waste and emission to treatment					
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary lai		0,007 kg	Lognormal	1,33	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to sanitary lan		0,03 kg	Lognormal	1,33	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
G230_Réservoir d'expansion		1 p	Amount		Importé de P230
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*0,001295 = 0,0648 tkm	Undefined		
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*4,7 = 235 kgkm	Undefined		Transport des métaux vers recycleurs
Waste and emission to treatment					
Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanita		0,5 kg	Lognormal	1,24	Fin de vie Qc. Incinération remplacée par enfouissement
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary lai		0,77 kg	Lognormal	1,24	Fin de vie Qc. Incinération remplacée par enfouissement
Disposal, polypropylene, 15.9% water, to sanitary land		0,025 kg	Lognormal	1,24	Fin de vie Qc. Incinération remplacée par enfouissement

## 2B. Solaire thermique à tubes sous vide

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité		Commentaires /hypothèses / Référence		
2B. Solaire thermique à tubes sous-vide (analyse de contribution)			1 MJ	Energy				
	P300_Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur	(1*LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_chauffe_eau/LifeSpanOutput_TubeColl)*0,87 = 3,87E-6 p		Phase Production		0,87 p de réservoir à eau chaude dans P302_Aggrégé pour chaque MJ produit		
	P220_Pompe à eau 40W	(LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_pompe_solaire/LifeSpanOutput_TubeColl) = 5,33E-6 p		Phase Production				
	P230_Réservoir d'expansion	1/LifeSpanOutput_TubeColl = 2,13E-6 p		Phase Production		Même durée de vie que le système.		
	P312_Collecteur solaire à tubes	Nbr_m2_CollTubes/LifeSpanOutput_TubeColl = 2,24E-5 m2		Phase Production				
		(1/LifeSpanOutput_TubeColl)*LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_plancher_radiant*PourcentMthTubes_toA						
	P32_Planchers radiants - distribution de la chaleur	ir = 5,33E-7 p		Phase Production				
	I302_Système solaire termique combiné (collecteur à tube)	(1/LifeSpanOutput_TubeColl) = 2,13E-6 p		Phase distribution - Installation				
		(1/LifeSpanOutput_TubeColl)*LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_plancher_radiant*PourcentMthTubes_toA						
	I340_Planchers radiants	ir = 5,33E-7 p		Phase distribution - Installation				
	E32_Système solaire thermique combiné à collecteurs tubes	1 MJ		Phase Exploitation		Extrait de la donnée originale de P302_Aggrégé		
	G300_Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur	(1*LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_chauffe_eau/LifeSpanOutput_TubeColl)*0,87 = 3,87E-6 p		Gestion en fin de vie		0,87 p de réservoir à eau chaude dans P302_Aggrégé pour chaque MJ produit		
	G312_Collecteurs solaires à tube	(1/LifeSpanOutput_TubeColl)*Nbr_m2_CollTubes = 2,24E-5 m²		Gestion en fin de vie		m2 de panneaux installé dans P302_aggrégé pour chaque MJ produit		
	G220_Pompe à eau 40W	(1/LifeSpanOutput_TubeColl)*3,12 = 6,66E-6 p		Gestion en fin de vie		3,12 p de pompe dans P302_Aggrégé pour chaque MJ produit		
	G230_Réservoir d'expansion	(1/LifeSpanOutput_TubeColl) = 2,13E-6 p		Gestion en fin de vie		1 p de réservoir d'expansion dans P302_Aggrégé pour chaque MJ produit		
		(1/LifeSpanOutput_TubeColl)*LifeSpan_TubeColl/LifeSpan_plancher_radiant*PourcentMthTubes_toA						
	G32_Planchers radiants	ir = 5,33E-7 p		Gestion en fin de vie		durée de vie du plancher radiant : 50 ans (2x celle du système)		
No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD¹	Min	Commentaires /hypothèses / Référence
P300_Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur			1 p	Amount				Adapté de Heat storage 2000i, at plant/CH/I U, SWITZERLAND
	Electricity, medium voltage, at grid - Am N U		45+45 = 90 kWh	Undefined			0	Questionnaire for 2000i storage
	Electricity, PV, at 3kWp slanted-roof, multi-Si, panel, mounted/CH U		0 kWh	Lognormal			1,24	45 kWh transférés à Electricity medium voltage, at grid
	Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U		198+146 = 344 MJ	Undefined				Questionnaire for 2000i storage
								146 MJ tranférés à Natural gas, burned in industrial furnace
	Wood chips, from forest, softwood, burned in furnace 300kW/CH U		0 MJ	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire for 2000i storage
	Hot water tank factory/CH/I U		2,00E-05 p	Lognormal			3,06	Processur original: Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U
	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U		1,7 kg	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Glass wool mat, at plant/CH U		25 kg	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Chromium steel 18/8, at plant/RER U		35 kg	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Steel, low-alloyed, at plant/RER U		305 kg	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Welding, gas, steel/RER U		10 m	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Sawn timber, softwood, planed, air dried, at plant/RER U		0,0667 m3	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Packaging, information by Wagner
	Tap water, at user/RER U		800*0 kg	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U		T_ress_region*0,366 = 549 tkm	Undefined				Donnée originale: 0,366 t x 50 km(4,5,na,na,na,na); Standard distance 50km
	Emissions to air (high. Pop)							
	Heat, waste		324 MJ	Lognormal			1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
P312_Collecteur solaire à tubes			1 m2	Area				Adapté de Evacuated tube collector, at plant/GB/I U, UNITED KINGDOM
	Electricity, medium voltage, at grid/GB U		17 kWh	Lognormal			1,6	(2,2,1,3,4,5); Questionnaire, data for other type of collector plus data for flat plate collector
	Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U		16,5 MJ	Lognormal			1,6	production
								(2,2,1,3,4,5); Questionnaire, data for other type of collector
	Tap water, at user/RER U		53,6 kg	Lognormal			1,6	(2,2,1,3,4,5); Questionnaire, data for other type of collector plus data for flat plate collector
	Water, completely softened, at plant/RER U		0,9 kg	Lognormal			1,3	production
	Solar collector factory/RER/I U		2,00E-07 p	Lognormal			3,1	Liquide caloporteur, fraction d'eau (environ 60%)
	Chemicals organic, at plant/GLO U		0,0113 kg	Lognormal			1,6	(2,5,1,1,3,5); Estimation for flat plate collector
	Hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant/RER U		0,113 kg	Lognormal			1,6	(2,2,1,3,4,5); Questionnaire, data for other type of collector
	Corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U		3,33 kg	Lognormal			1,2	(2,2,1,3,4,5); Questionnaire, data for other type of collector
	Glass tube, borosilicate, at plant/DE U		14,2 kg	Lognormal			1,3	(3,4,3,1,1,3); Company information, packaging
	Synthetic rubber, at plant/RER U		0,667 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire plus 5% losses
	Rock wool, packed, at plant/CH U		2,03 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Silicone product, at plant/RER U		0,0533 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Copper, at regional storage/RER U		2,8 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Brazing solder, cadmium free, at plant/RER U		0,1 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Propylene glycol, liquid, at plant/RER U		0,654 kg	Lognormal			1,3	Liquide caloporteur, antigel (environ 40% dans de l'eau déminéralisée)
	Chromium steel 18/8, at plant/RER U		4 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U		T_ress_region*0,028 = 42 tkm	Undefined				Donnée originale: 0,028 x 600
	Transport, lorry >16t, fleet average/RER U		T_ress_region*Masse_tot = 4,34E4 kgkm	Undefined				Donnée originale: 0,028 x 600
	Selective coating, copper sheet, physical vapour deposition/DE U		1 m2	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Anti-reflex-coating, etching, solar glass/DK U		1 m2	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Sheet rolling, copper/RER U		2,8 kg	Lognormal			1,3	(2,5,1,1,1,5); Questionnaire
	Emissions to air (high. Pop)							
	Heat, waste		61,3 MJ	Lognormal			1,3	(3,5,1,1,1,5); Estimation
Paramètres locaux								
	Masse_tot		28,8586 kg					Masse totale des composantes à transporter
	Masse_tot_produit_fini		28,7343 kg					Masse composant le produit qui sera livré
P220_Pompe à eau 40W			1 p	Amount				Adapté de Pump 40W, at plant/CH/I U, SWITZERLAND
Voir onblet 2A.								

P230_Réservoir d'expansion		1 p	Amount	Adapté de Expansion vessel 25l, at plant/CH/I U SWITZERLAND	
Voir onblet 2A.					
P32_Planchers radiants - distribution de la chaleur		1 p	Amount		
Voir onblet 1A.					
I302_Système solaire termique combiné (collecteur à tube)		1 p	Amount	Adapté de Heat, at tube collector, one-family house, for combined system/CH U (pour un système de 10,5 m²) HYP: la qté de tuyauterie nécessaire est linéaire en fonction de la surface des panneaux.	
Tube insulation, elastomere, at plant/DE U		5,2*Nbr_m2_CollTubes/10,5 kg	Lognormal	1,3	
Copper, at regional storage/RER U		16*Nbr_m2_CollTubes/10,5 kg	Lognormal	1,3	(3,5,3,1,1,na); Plant data, warm water pipes
Drawing of pipes, steel/RER U		16*Nbr_m2_CollTubes/10,5 kg	Lognormal	1,3	(3,5,3,1,3,na); Estimation for copper pipes
Transport, van <3.5t/RER U		T_ress_local*(Masse_tot_produit_fini+(5,2+16+16)*Nbr_m2_CollTubes/10,5) = 3,3E4 kgkm	Undefined		Poid total du sys (y compris les matériaux de tuyauterie)
Paramètres locaux					
Masse_tot_produit_fini		28,7343 kg	Masse composant le produit qui sera livré (voir P312)		
I32_Planchers radiants		1 p	Amount		
Voir onblet 1A.					
E32_Système solaire thermique combiné à collecteurs tubes		1 MJ	Energy	Adapté de Heat, at tube collector, one-family house, for combined system/CH U	
Energy, solar, converted		1,1334 MJ	Lognormal	1,0714	Donnée originale: 1,1334 MJ Perte du système de 13,34% par rapport au MJ de rendement (output) (2,na,1,1,1,na); Includes losses in the system
Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011		0,0095765/0,98 = 0,00977 kWh	Undefined		Perte de tension de 2% entre le réseau basse tension et la maison (voir kWh de ref pour la source)
Propylene glycol, liquid, at plant/RER U		0,654*Nbr_m2_CollTubes*nbre_entretiens/LifeSpanOutput_TubeColl = 2,93E-5 kg	Undefined		La quantité initiale contenue dans 1 m² de panneau (0,654 kg) est remplacée 2 fois dans la durée de vie totale du système.
Water, completely softened, at plant/RER U		0,9*Nbr_m2_CollTubes*nbre_entretiens/LifeSpanOutput_TubeColl = 4,03E-5 kg	Undefined		La quantité initiale contenue dans 1 m² de panneau (0,9 kg) est remplacée 2 fois dans la durée de vie totale du système.
Transport, van <3.5t/CH U		T_ress_local*(M_eau_demin+M_antigel) = 0,0348 kgkm	Undefined		
Transport, passenger car, petrol, EUROS/CH U		T_maintenance*Nbre_chgmt_liq_calor/LifeSpanOutput_TubeColl = 0,000213 personkm	Undefined		
Emissions to air (high. Pop)					
Heat, waste		1,1679 MJ	Lognormal	1,0714	Donnée originale: 1,1679 MJ Perte de chaleur de 16,79% par rapport au MJ de rendement (output)
Waste and emission to treatment					(2,na,1,1,1,na); Simulation and solar energy
Treatment, heat carrier liquid, 40% C3H8O2, to wastewater treatment, class		1,55e-3*Nbr_m2_CollTubes*Nbre_chgmt_liq_calor/LifeSpanOutput_TubeColl = 6,94E-8 m3	Undefined		Quantité de fluide caloporteur rejetée lors de l'entretien (remplacements)
Paramètres locaux					
Nbre_chgmt_liq_calor		2 fois	Considérant un remplacement aux 10 ans approximativement		
M_eau_demin		0,9*Nbr_m2_CollTubes*Nbre_chgmt_liq_calor/LifeSpanOutput_TubeColl = 4,03E-5 kg			
M_antigel		0,654*Nbr_m2_CollTubes*Nbre_chgmt_liq_calor/LifeSpanOutput_TubeColl = 2,93E-5 kg			
G300_Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur		1 p	Amount		
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*(25+5) = 1,5E3 kgkm	Undefined		Transports matériaux vers enfouissement
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*(35+305) = 1,7E4 kgkm	Undefined		Transport des métaux vers recycleurs
Waste and emission to treatment					
Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH U		25 kg	Lognormal	1,24	Remplace Disposal, building, mineral wool, to sorting plant/CH U (éviter double comptage transport)
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U		5 kg	Lognormal	1,24	Incinération remplacée par enfouissement (Qc) - Packaging wastes
Treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2/CH U		0,8 m3	Lognormal	1,24	(2,4,1,1,1,5); Questionnaire
G312_Collecteurs solaires à tube		1 m²		pour 1 m² de panneau (tiré de Evacuated tube collector, at plant/GB/I U)	
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*0,0212154 = 1,06 tkm	Undefined	0	
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*(2,8+0,1+4) = 345 kgkm	Undefined	0	0 Transport des métaux vers recycleurs
Waste and emission to treatment					
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U		14,2 kg	Lognormal	1,3	Remplace Disposal, building, glass sheet, to sorting plant/CH U
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U		0,72 kg	Lognormal	1,3	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanitary landfill/CH U		3,33 kg	Lognormal	1,3	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH U		2,03 kg	Lognormal	1,3	Remplace Disposal, building, mineral wool, to sorting plant/CH U
Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill/CH U		0,0284 kg	Lognormal	1,6	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, glass, 0% water, to inert material landfill/CH U		0,68 kg	Lognormal	1,6	
Disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration/CH U		0,227 kg	Lognormal	1,6	Incinération des déchets dangereux conservée.
Treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2/CH U		0,0442 m3	Lognormal	1,6	
Waste and emission to treatment					
Treatment, heat carrier liquid, 40% C3H8O2, to wastewater treatment, class		1,55E-03 m3	Undefined		Quantité de fluide caloporteur rejetée en fin de vie du système. Basé sur Evacuated tube collector, at plant (pour 1m²)
G220_Pompe à eau 40W		1 p	Amount		
Voir onblet 2A.					
G230_Réservoir d'expansion		1 p	Amount		
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U		T_waste*0,001295 = 0,0648 tkm	Undefined	0	
Waste and emission to treatment					
Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanitary landfill/CH U		0,5 kg	Lognormal	1,24	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U		0,77 kg	Lognormal	1,24	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
Disposal, polypropylene, 15.9% water, to sanitary landfill/CH U		0,025 kg	Lognormal	1,24	Incinération remplacée par enfouissement (Qc)
G32_Planchers radiants		1 p	Amount		
Voir onblet 1A.					

## 2C. Solaire thermique chauffe-air (collecteurs à air vitrés)

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires / hypothèses / Référence		
2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)			1 MJ	Energy	Yield_collAir = 1500 kWh/capteur-année (3.6 MJ = 1 kWh) Le sys comporte 2 capteurs; durée de vie estimée du sys = 37.5 ans		
	P11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0 (production et transport des composantes vers P12_Sys. de ventilation (distribution de l'air : conduites, filtre (à l'entrée), ventilateur (à la sortie))		1/(Yield_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 4,94E-6	p	Phase Production		
	P13_Contrôleur différentiel et filage (modélisé à partir d'une donnée générique pour sys. ventilation)		1/(Yield_collAir*Nbr_collAir*3,6*LifeSpan_systVent) = 1,85E-6	p	Phase Production		
	I101_Système de captage solaire à air		1/(Yield_collAir*Nbr_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 2,47E-6	p	Hyp: le contrôleur a la même durée de vie que le système ESOLAIR		
	E11_Système solaire thermique à collecteurs chauffe-air (estimation de l'utilisation 2000h/an)		1/(Yield_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 4,94E-6	p	Phase distribution - Installation		
	G11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0		1 MJ		Phase Exploitation		
	G12_Système de ventilation		1/(Yield_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 4,94E-6	p	Gestion en fin de vie		
	G13_Contrôle		1/(Yield_collAir*Nbr_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 1,85E-6	p	Gestion en fin de vie		
	G13_Contrôle		1/(Yield_collAir*Nbr_collAir*3,6*LifeSpan_ESOLAIR) = 2,47E-6	p	Gestion en fin de vie		
No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Distribution	SD <sup>2</sup>	Commentaires / hypothèses / Référence
P11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0 (production et transport des composantes vers l'assemblage)			1 p	Amount			Source: Favreau (2010)
	Aluminium, production mix, at plant/RER U		2,8	kg	Undefined		pour l'absorbeur; grid mix Europe
	Transport, transoceanic freight ship/OCE U		2,8*3277*1,852 = 1,7E4	kgkm	Undefined		3277 miles nautiques depuis l'Allemagne; 1.852 mile nautique/km
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		2,8*32 = 89,6	kgkm	Undefined		hypothèse: 20 km par camion jusqu'au port en Allemagne et 12 km du port de Mtl à MC2
	Sanitary ceramics, at regional storage/CH U		0	kg	Undefined		oxydic ceramic, pour l'absorbeur (proportion non spécifiée)
	Aluminium, production mix, at plant/RER U		2,1+0,9 = 3	kg	Undefined		pour l'intérieur et le fond de l'échangeur; grid mix Am. du Nord
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		(2,1+0,9)*1120 = 3,36E3	kgkm	Undefined		Depuis l'Ohio, USA : environ 1120 km
	Solar glass, low-iron, at regional storage/RER U		24,9	kg	Undefined		vitre; grid mix Am. du Nord
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		24,9*1864 = 4,64E4	kgkm	Undefined		Depuis le Tennessee, USA : environ 1864 km
	Rock wool, at plant/CH U		6,8	kg	Undefined		isolant; grid mix Am. du Nord
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		6,8*550 = 3,74E3	kgkm	Undefined		Depuis le Ontario (hyp : Toronto), Can : environ 550 km
	Steel, converter, chromium steel 18/8, at plant/RER U		0,5	kg	Undefined		Bandes de finition intérieur; grid mix Am. du Nord
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		0,5*1120 = 560	kgkm	Undefined		Depuis l'Ohio, USA : environ 1120 km
	Aluminium, production mix, at plant/RER U		16,3	kg	Undefined		Boitier; grid mix Am. du Nord
							sur une surface de 5 x 10 pi (approx. 5 m² x 2 couches).
							The density of a solvent rich paint is about 1.2 g/cm³
							Use: According to the directions for use the paint coverage is about 12-15 m2 /l
							Source: <a href="http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/320104008.pdf">http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapportes/320104008.pdf</a>
	Alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant/RER U		5*2*1,2/12 = 1	kg	Undefined		Depuis Brossard : environ 4km
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		16,3*4 = 65,2	kgkm	Undefined		Collets; grid mix Am. du Nord
	Aluminium, production mix, at plant/RER U		1,4	kg	Undefined		Depuis Beloeil : environ 28.5 km
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		1,4*28,5 = 39,9	kgkm	Undefined		joints d'étanchéité; grid mix Am. du Nord
	Silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant/RER U		0,9	kg	Undefined		Depuis les USA :hyp. 1500 km
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		0,9*1500 = 1,35E3	kgkm	Undefined		Cale entre vitre et boitier; grid mix Am. du Nord
	Glass fibre, at plant/RER U		0,9	kg	Undefined		11497 miles nautiques depuis Hong Kong; 1.852 mile nautique/km
	Transport, transoceanic freight ship/OCE U		0,9*11497*1,852 = 1,92E4	kgkm	Undefined		hypothèse: 20 km par camion jusqu'au port en Chine et 12 km du port de Mtl à MC2
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		0,9*32 = 28,8	kgkm	Undefined		Quincaillerie (Boulon, pop rivet, insert,ect.); grid mix Am. du Nord
	Steel, converter, low-alloyed, at plant/RER U		1,4	kg	Undefined		Depuis le Ontario (hyp : Toronto), Can : environ 550 km
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U		1,4*550 = 770	kgkm	Undefined		Total énergie de fabrication (assemblage) au Qc
	Electricity, low voltage, at grid - Qc U		6	kWh	Undefined		Basé sur l'emballage des systèmes solaires à collecteurs plats. 3,68 kg carton/m² de panneau.
							Taille d'un panneau ESOLAIR : 2,34m x 1,12m. Source:
	Corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/CH U		3,68*2,62 = 9,64	kg	Lognormal		1,2 <a href="http://mc2energie.com/fichiers/EFMK_1_3G_installation%20_fr_R4.pdf">http://mc2energie.com/fichiers/EFMK_1_3G_installation%20_fr_R4.pdf</a>
P12_Sys. de ventilation (distribution de l'air : conduites, filtre (à l'entrée), ventilateur (à la sortie))			1 p	Amount			Adapté de Ventilation system, decentralized, 6 x 120 m3/h, steel ducts, without GHE/CH/I, en fonction du système ESOLAIR 2.0 (source: Favreau, 2010)
2,423	kg/p	Supply air inlet, steel/SS, DN 75, at plant/RER U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
0,451	kg/p	Exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125, at plant/CH U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
10,2	kg/p	Air distribution housing, steel, 120 m3/h, at plant/CH U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Overflow element, steel, approx. 40 m3/h, at plant/RER U		0 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
2,093	kg/m	Spiral-seam duct, steel, DN 125, at plant/RER U		4 m	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
1,65	kg/m	Ventilation duct, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		4 m	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
0,297	kg/p	Elbow 90°, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		2 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
0,22	kg/p	Connection piece, steel, 100x50 mm, at plant/RER U		2 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Flexible duct, aluminum/PET, DN of 125, at plant/RER U		0 m	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
7,37	kg/p	Silencer, steel, DN 125, at plant/CH U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h, at plant/RER U		0 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Air filter, in exhaust air valve, at plant/RER U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Sealing tape, aluminum/PE, 50 mm wide, at plant/RER U		0 m	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
		Ventilation equipment, decentralized, 180-250 m3/h, at plant/RER U		0 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
2,31	kg/p	Exhaust air outlet, steel/aluminum, 85x365 mm, at plant/CH U		1 p	Undefined		Questionnaire, Data related to building considered
38,76	kg	Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	40*T_ress_local/5 = 4E3	kgkm	Undefined		0 40kg. Estimé à partir de la masse des composantes retenus pour le système de ventilation ESOLAIR
20,739							
P13_Contrôleur différentiel et filage (modélisé à partir d'une donnée générique pour sys. ventilation)			1 p	Amount			Importé de P12_Sys. de ventilation (distribution de l'air : conduites, filtre (à l'entrée), ventilateur (à la sortie)) pour STECA TR 0301U
	Control and wiring, decentralized unit, at plant/RER U		6/6 = 1	p	Undefined		Dimension réelle : 160 mm x 157 mm x 47 mm (boitier) Actual Total weight: 350g Questionnaire, Data related to building considered
I101_Système de captage solaire à air			1 p	Amount			Adapté de Solar system, flat plate collector, one-family house, hot water/CH/I U SWITZERLAND
							Poids du sys (capteur seulement): 58.8 kg
	Transport, van <3.5t/RER U		T_ress_local*(58,8) = 2,94E4	kgkm	Undefined		On présume que le système de ventilation doit être transporté également car on remplace du chauffage électrique
E11_Système solaire thermique à collecteurs chauffe-air (estimation de l'utilisation 2000h/an)			1 MJ	Energy			ESOLAIR 2.0 = 2.6 m² de surface de captage par capteur. Il est posé qu'étant donné la petite taille du système de

Energy, solar, converted	Nbr_collAir*(1,126/4,73) = 0,476 MJ	Undefined	Includes losses in the system; Adapté de Panneau solaire à collecteur plat (12.3 m²) et donc on divise par 4.73 pou
Electricity, low voltage, at grid - Qc U, 2011	Nbr_collAir*120*37,5/0,98/LifeSpanOutput_CollAir = 0,0227 kWh	Undefined	Selon la fiche technique de Fantech (FG series), Inline duct fan, Model FG6 mais la puissance réelle est de 60W (selon Éric Favreau)
Air filter, in exhaust air valve, at plant/RER U			60Wx2000h/an = 120 kWh/an/capteur (2000h = hyp tirée de l'exploitation du sys géothermique):
Waste and emission to treatment			Noter aussi que : 50% de la puissance contribue à chauffer l'air et 50% pousse l'air dans la conduite
Disposal, air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h/CH U	Nb_filtres/(Yield_collAir*Nbr_collAir*3,6*lifespans_filtres) = 4,63E-5 p	Undefined	Considérant que le filtre est changé tous les deux ans.
<u>Paramètres locaux</u>			
Nb_filtres	1		unités
LifeSpan_filtres	2		ans
<b>G11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Le métal est considéré recyclé (cut off). Seul son transport est inclus.</b>
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*(25,8+6,8+0,9) = 1,68E3 kgkm	Undefined	Verre, laine de verre, laine minérale et silicone, vers enfouissement
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*(2,8+3+0,5+1,4+1,4) = 455 kgkm	Undefined	Métaux, vers recyclage
Waste and emission to treatment			
Disposal, glass, 0% water, to inert material landfill/CH U	24,9+0,9 = 25,8 kg	Undefined	
Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH U	6,8 kg	Undefined	
Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U	0,9 kg	Undefined	
<b>G12_Système de ventilation</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	<b>Les processus de traitement des rejets ont été modifiés pour remplacer l'incinération par l'enfouissement (fin de vie au Québec)</b>
Transport, lorry 3.5-20t, fleet average/CH U	T_waste*0,040 *0 = 0 tkm	Undefined	Le transport est enlevé pour éviter le double comptage, car les processus de traitement des rejets incluent du transport.
Waste and emission to treatment			Calculé à partir de la masse des composantes retenues dans le système de ventilation (P12), qui ne sont pas déjà in
Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant/CH U	20 kg	Undefined	
Disposal, exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125/CH U	1 p	Undefined	
Disposal, air distribution housing, steel, 120 m3/h/CH U	1 p	Undefined	
Disposal, overflow element, steel, approx. 40 m3/h/CH U	0 p	Undefined	
Disposal, flexible duct, aluminum/PET, DN of 125/CH U	0 m	Undefined	
Disposal, silencer, steel, DN 125/CH U	1 p	Undefined	
Disposal, air filter, decentralized unit, 180-250 m3/h/CH U	0 p	Undefined	
Disposal, air filter, in exhaust air valve/CH U	1 p	Undefined	
Disposal, sealing tape, aluminum/PE, 50 mm wide/CH U	0 m	Undefined	
Disposal, ventilation equipment, decentralized, 180-250 m3/h/CH U	0 p	Undefined	
<b>G13_Controlleur</b>	<b>1 p</b>	<b>Amount</b>	
Waste and emission to treatment			
Disposal, control and wiring, decentralized unit/CH U	6/6 = 1 p	Undefined	0 Gestion en fin de vie non modifiée (tel quel ecoinvent) car la gestion au Québec n'est pas connue
Disposal, electronics for control units/RER U	0,35 kg	Lognormal	1,3 Gestion en fin de vie non modifiée (tel quel ecoinvent) car la gestion au Québec n'est pas connue

## Scénarios pour répondre à la demande en énergie thermique d'une résidence québécoise

Pour le détail des processus listés, voir les onglets jaunes précédents

No	Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires /hypothèses / Référence
<p>Il est présumé que 75% du MJ entrant (excluant l'énergie pour alimenter les électroménagers) va à chauffer l'air et 25% à chauffer l'eau.                      Le scénario de base de consommation d'énergie prend en compte les données de consommation énergétique de 2011 (tarif kWh de mars 2011) pour un ménage de 4 personnes occupant 150 m<sup>2</sup> (résidence unifamiliale construite après 1940) (source : OEE). Il prend en compte les caractéristiques du parc immobilier du Qc (% de logements par année de construction) selon le recensement de 2006 (source : Stat Canada). Voir onglet "Calculs -demande résidence" pour les détails.</p>					
<b>1A. Géothermie eau-eau + électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
	1A.1 Géothermie eau-eau , chauffage de l'air seulement	PourcentMJthGeo_toAir*(PourcentDemAir_GeothEau) = 0,95	MJ	Undefined	1) imputation sur base énergétique : 95% de l'énergie sortante sert à chauffer de l'air et 5% t à chauffer de l'eau; 2) 100% de la demande en chauffage peut être comblée par le système géo eau-eau
	1A.2 Géothermie eau-eau, chauffage de l'eau seulement	PourcentMJthGeo_toEau*PourcentDemEau_GeothEau = 0,007	MJ	Undefined	1) idem 2) 14% de la demande en eau chaude peut être comblée par le système géo eau-eau
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentMJthGeo_toEau*(1-PourcentDemEau_GeothEau) = 0,043	MJ	Undefined	1) idem 2) Il est présumé que le 86% restant d'énergie de chauffage de l'eau chaude provient du réseau HQ (auxiliaire = chauffe-eau électrique)
<b>1B. Géothermie eau-air + électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
Même commentaire que 1A. Géothermie eau-eau + électricité					
	1A.1 Géothermie eau-eau , chauffage de l'air seulement	PourcentMJthGeo_toAir*PourcentDemAir_GeothAir = 0,95	MJ	Undefined	100% de la demande en chauffage peut être comblée par le système géo eau-air
	1B.2 Géothermie eau-air, chauffage de l'eau seulement	PourcentMJthGeo_toEau*PourcentDemEau_GeothAir = 0,007	MJ	Undefined	ici 95% des infrastructures du système géoth. eau-air sont sollicitées (pour 0.95 MJ de l'UF) 14% de la demande en eau chaude peut être comblée par le système géo eau-air
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentMJthGeo_toEau*(1-PourcentDemEau_GeothAir) = 0,043	MJ	Undefined	Ici, 5%x14% des infrastructures du système géoth. eau-air sont sollicitées (pour 0.007 MJ de l'UF) Il est présumé que le 86% restant d'énergie de chauffage de l'eau chaude provient du réseau HQ Ici, 5%x86% des infrastructures du système auxiliaire sont sollicitées (pour 0.043 MJ de l'UF)
<b>2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
Même commentaire que 1A. Géothermie eau-eau + électricité					
	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution)	PourcentDemThMaison_toEau*PourcentDemEau_CollPlats = 0,127	MJ	Undefined	
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentDemThMaison_toEau*(1-PourcentDemEau_CollPlats) = 0,123	MJ	Undefined	Il est présumé que la balance d'énergie provient du réseau HQ
	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	PourcentDemThMaison_toAir = 0,75	MJ	Undefined	Le chauffe-eau solaire est placé en série avec le chauffe-eau électrique "classique" (qui n'est imputé à aucun des système décentralisé)
<b>2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
Même commentaire que 1A. Géothermie eau-eau + électricité					
	2B.1 Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide, chauffage de l'air seulement	PourcentDemThMaison_toAir*PourcentDemAir_CollTubes = 0,102	MJ	Undefined	
	2B.2 Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide, chauffage de l'eau seulement	PourcentDemThMaison_toEau*PourcentDemEau_CollTubes = 0,102	MJ	Undefined	
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentDemThMaison_toEau*(1-PourcentDemEau_CollTubes) = 0,148	MJ	Undefined	Il est présumé que la balance d'énergie provient du réseau HQ
	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	PourcentDemThMaison_toAir*(1-PourcentDemAir_CollTubes) = 0,648	MJ	Undefined	
<b>2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
Même commentaire que 1A. Géothermie eau-eau + électricité					
	2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)	PourcentDemThMaison_toAir*PourcentDemAir_CollAir = 0,118	MJ	Undefined	
	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	PourcentDemThMaison_toAir*(1-PourcentDemAir_CollAir) = 0,632	MJ	Undefined	Il est présumé que la balance d'énergie provient du réseau HQ
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentDemThMaison_toEau*1 = 0,25	MJ	Undefined	
<b>Ref - 100% électricité</b>			<b>1</b>	<b>MJ</b>	<b>Energy</b>
	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	PourcentDemThMaison_toEau = 0,25	MJ	Undefined	
	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	PourcentDemThMaison_toAir = 0,75	MJ	Undefined	

# Demande en énergie thermique d'une résidence québécoise moyenne - Scénarios

Consommation d'énergie moyenne d'une habitation québécoise (sur 12 mois) - données de mars 2011

Nombre d'occupant  
 Région  
 Année de construction  
 Type de rés.  
 Surface habitable  
 Sys. de chauffage

4  
 Québec  
 variable  
 Unifamiliale  
 150 m²  
 électricité

Année de construction de la résidence

	1940			1950			1970			1980			1990			2000			2010		
	\$	kWh	%	\$	kWh	%	\$	kWh	%	\$	kWh	%	\$	kWh	%	\$	kWh	%	\$	kWh	%
Chauffage	2256,00	27279	68,4%	1682,00	20339	61,8%	1332,00	16106	56,2%	1352,00	16348	56,5%	1202,00	14534	53,6%	1202,00	14534	53,6%	1202,00	14534	53,6%
Électroménagers	579,00	7001	17,6%	579,00	7001	21,3%	579,00	7001	24,4%	579,00	7001	24,2%	579,00	7001	25,8%	579,00	7001	25,8%	579,00	7001	25,8%
Eau chaude	461,00	5574	14,0%	461,00	5574	16,9%	461,00	5574	19,4%	461,00	5574	19,3%	461,00	5574	20,6%	461,00	5574	20,6%	461,00	5574	20,6%
<b>Total</b>	<b>3296,00</b>	<b>39855</b>	<b>100,0%</b>	<b>2722,00</b>	<b>32914</b>	<b>100,0%</b>	<b>2372,00</b>	<b>28682</b>	<b>100,0%</b>	<b>2392,00</b>	<b>28924</b>	<b>100,0%</b>	<b>2242,00</b>	<b>27110</b>	<b>100,0%</b>	<b>2242,00</b>	<b>27110</b>	<b>100,0%</b>	<b>2242,00</b>	<b>27110</b>	<b>100,0%</b>

Coût unitaire (mars 2011)	0,0827 \$/kWh
---------------------------	---------------

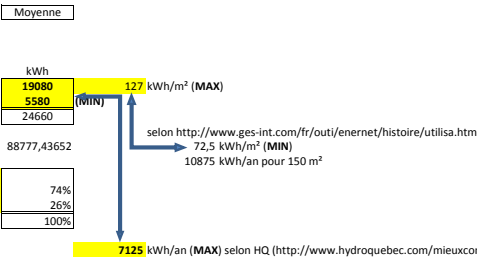
Source:

[http://coutsenergie.aee.gouv.qc.ca/comp\\_couts.asp](http://coutsenergie.aee.gouv.qc.ca/comp_couts.asp)

Parc immobilier résidentiel du Québec - % des logements par année de construction (recensement 2006)

[http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/lequebec\\_20/logements\\_20/logerio20.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/lequebec_20/logements_20/logerio20.htm)

Total	Avant 1981	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2006	Moyenne
	%						
<b>Le Québec</b>	65%	8%	9%	7%	5%	7%	
Montréal	79%	6%	6%	3%	2%	4%	
Demande annuelle moyenne							
Chauffage	21241	16348	14534	14534	14534	14534	kWh
Eau chaude	5574	5574	5574	5574	5574	5574	
Total	26816	21923	20109	20109	20109	20109	
Part théorique de la demande annuelle							
Chauffage	79%	75%	72%	72%	72%	72%	75%
Eau chaude	21%	25%	28%	28%	28%	28%	25%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%



Capacité des systèmes à satisfaire la demande globale de la résidence

Scénarios	Système	Année de publication des données	Output		% de la demande		Balance électrique		Source/commentaire
			(kWh/an)	%	Chauffage	Eau chaude	Chauffage	Eau chaude	
Référence	Électricité	2011	-		100%	100%	0%	0%	
1A	Géothermie eau-eau (désurchauffeur)	2002	20000	81%	100%	14%	0%	86%	rapport ecoinvent. Selon la quantité d'eau chaude utilisée, un désurchauffeur peut fournir de 30 à 60 % de l'eau chaude consommée dans une maison ordinaire.
1B	Géothermie eau-air (désurchauffeur)	2002	20000	81%	100%	14%	0%	86%	rapport ecoinvent.Selon la quantité d'eau chaude utilisée, un désurchauffeur peut fournir de 30 à 60 % de l'eau chaude consommée dans une maison ordinaire.
2A	Solaire th. à collecteurs plats (eau chaude)	2002	3234	13%	0%	51%	100%	49%	rapport ecoinvent: quantité d'énergie fourni par le système sur 25 ans ; il est présumé que 100% de la chaleur fournie va à chauffer l'eau chaude sanitaire et 0% à chauffer l'air (contexte nord-américain). Un tel système ne semble pas justifier l'installation d'un plancher radiant pour
2B	Solaire th. à tubes sous-vide (combiné)	2002	5207	21%	14%	41%	86%	59%	rapport ecoinvent. Il est présumé que l'installation du plancher radiant est justifiée par le capacité du sys à chauffer l'air (questionnable!!), sys semble peu réaliste réaliste: quel scénario préconiser pour le Qc/Canada)
2C	Solaire th. chauffe-air	2009	3000	12%	16%	0%	84%	100%	Système à 2 capteurs ; 1500 kWh de chauffage/capteur-an (moyenne pour le ESOLAIR 2.0) ; orientation sud à 60 degrés

1 m³ =	10,76391042 ft³	3,60E+06 MJ	2,78E-07 p/MJ	194166
		291060 MJ	3,44E-06 p/MJ	468720
		468597 MJ	2,13E-06 p/MJ	
1 kWh =	3,6 MJ	405000 MJ	2,47E-06 p/MJ	

Output/an	
Solaire à air	10800 MJ/an
Géothermie	72000 MJ/an
Solaire à coll. plats	11642 MJ/an
Solaire à coll. tubes	18744 MJ/an

## Climatisation - Données technique et modélisation

Climatiseur mural  
(Inventaire) [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These\\_grignon\\_masse.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These_grignon_masse.pdf)  
(25 sept 2012)

Consommation électrique  
(OEÉ, 2009)   
Tableau de la Base de données complète sur la consommation d'énergie, Secteur résidentiel, Québec.  
Tableau 4 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES pour la climatisation par type de climatiseur. [Page consultée le 25 septembre 2012  
[http://oe.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableauxevolution2/res\\_qc\\_4\\_f\\_4.cfm?attr=0](http://oe.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableauxevolution2/res_qc_4_f_4.cfm?attr=0)  
(consulté 25 sept 2012) (voir tableau reproduit à droite)

Maison de référence  
25,7 MJ/m<sup>2</sup>.an (OEÉ en 2009)  
150 m<sup>2</sup>  
3855 MJ/an

Puisqu'il n'existe pas de données génériques sur les climatiseurs dans la banque de données ecoinvent, les informations provenant d'une étude publiée ont été utilisées  
Grignon-Masse (2010)  
[http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These\\_grignon\\_masse.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/80/PDF/These_grignon_masse.pdf)  
25 sept.

**Climatiseurs individuels de 3,5 kW (18000 BTU).**  
Normalement, un climatiseur de 18 000 BTU permet de climatiser une surface de 35 m<sup>2</sup> à 50 m<sup>2</sup>  
Source : <http://www.specialistes-climatisation.com/climatisation.html>  
**Durée de vie de 12 ans** **3 climatiseurs ont donc été considérés pour la maison de 150 m<sup>2</sup>**

### Matériaux:

### Durée de vie

#### 4.2.2.1. Phase de production

L'impact environnemental de cette phase de la vie du produit dépend des matériaux que le produit contient et de leurs quantités. Dans le cadre du projet sur l'écoconception des climatiseurs individuels, plusieurs fabricants ont fourni la description de certains de leurs appareils en termes de matériaux utilisés et les poids correspondants (Rivière et al., 2009). Ceci nous a permis de construire un inventaire des matériaux pour les deux cas de référence (Tableau 4.14). L'unique différence entre les cas réversible et non réversible est l'ajout d'une vanne quatre voies, d'un deuxième détendeur et d'un peu plus de cuivre pour la tuyauterie. Concernant les réparations et la maintenance, la valeur de 1 % de surcoûts supplémentaires est retenue (V20K, 2005).

Tableau 4.14. Inventaire des matériaux contenus dans les deux appareils de référence

Matériaux composant les produits	Poids [g]	
	Appareil de référence non réversible (3,5 kW)	Appareil de référence réversible (3,5 kW)
Plastiques	8501,2	8601,2
Métal fourré	10521,9	10521,9
Métal non fourré	10516,3	11016,3
Électronique	1461,5	1461,5
Autres matériaux divers	5053,3	5053,3

Le Tableau 4.15 présente une comparaison des durées de vie des climatiseurs de type Split selon différentes sources. Ces valeurs sont comprises entre 10 et 16 ans, une durée de vie de 12 ans est finalement retenue pour la suite de notre étude.

Tableau 4.15. Durées de vie des climatiseurs de type Split

Sources	Durées de vie [années]
(Energy Star, 2007)	10
(MEDAD, 2009)	16
(Adnot et al., 1999)	12,5
(JRAIA, 2004b)	12

#### Autres sources pour la durée de vie:

15 ans [http://www.master.ca/fr/consommateurs/info\\_conf/climatisation101.sn](http://www.master.ca/fr/consommateurs/info_conf/climatisation101.sn)  
12 à 15 ans bon appareils <http://www.climatisation-chauffage-laval.com/questions%20sur%20les%20mini-split.html>  
qqe années si mal installé idem  
10 ans En général, le <http://oe.nrcan.gc.ca/node/15086> ou <http://publications.gc.ca/collections/Collection/M91-23-7-2003F.pdf>

Quantité initiale de liquide 0,8 kg  
Fuites de frigorigène: 4% annuellement

Nom	Processus ecoinvent	Qté	Unité	Commentaires /hypothèses / Référence
<b>1A. Géothermie liq.-eau + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>				
	1A. Géothermie eau-eau + électricité	Consom_residence = 2,47E4 kWh	1 p	1 an
	Operation climatiseur _ 1 an		1 p	
<b>1B. Géothermie liq.-air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>				
	1B. Géothermie eau-air + électricité	Consom_residence = 2,47E4 kWh	1 p	1 an
	E01_Système géothermique eau-air (climatisation directe)	Climatisation_residence = 3,86E3 MJ		Voir onglet 1B pour le détail de ce processus
<b>2A. Sol. therm coll. plats + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>				
	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité	Consom_residence = 2,47E4 kWh	1 p	1 an
	Operation climatiseur _ 1 an		1 p	
<b>2B. Sol. therm tubes sous vide + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>				
	2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité	Consom_residence = 2,47E4 kWh	1 p	1 an
	Operation climatiseur _ 1 an		1 p	



<b>2C. Sol. therm chauffe air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>		<b>1 p</b>	<b>1 an</b>
2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité *corrigé*		Consom_residence = 2,47E4 kWh	
Operation climatiseur _ 1 an		1 p	
<b>Ref 100% electrique (chauffage et clim d'une résidence moyenne)</b>		<b>1 p</b>	<b>1 an</b>
Ref - 100% électricité		Consom_residence = 2,47E4 kWh	
Operation climatiseur _ 1 an		1 p	
<b>Operation climatiseur _ 1 an</b>		<b>1 p</b>	<b>Production du climatiseur + consommation électrique + fuites de réfrigérant. Fin de vie exclue par manque de données.</b>
Emissions à l'air	Electricity, low voltage, at grid - Qc U	Climatisation_residence = 3,86E3 MJ	
	Climatiseur 18000 BTU (3,5kW)	Nb_climatiseurs/12 = 0,25 p	3 climatiseurs 18000 BTU, 12 ans durée de vie
	Ethane, pentafluoro-, HFC-125	Nb_climatiseurs*0,8*,5* kg	0,8 kg de réfrigérant R410A) dans appareil. 50% R32, 50%
	Methane, difluoro-, HFC-32	Nb_climatiseurs*0,8*,5* kg	R125 ( <a href="http://www.ableairinc.com/html/r22___r410.html">http://www.ableairinc.com/html/r22___r410.html</a> )
<b>Climatiseur 18000 BTU (3,5kW)</b>		<b>1 p</b>	<b>Données tirées de Grignon-Masse (2010)</b>
Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U		8,6 kg	
Steel, converter, low-alloyed, at plant/RER U		19,8 kg	
Aluminium, production mix, at plant/RER U		10,5 kg	
Electronics for control units/RER U		1,5 kg	
Refrigerant R134a, at plant/RER U		0,8 kg	Proxy pour R410 (Grignon-Masse, 2010)

**Annexe D :**  
**Évaluation de la qualité des données d'inventaire**

---

## D.1 Critères d'évaluation de la qualité des données

Le Tableau D-1 présente les critères de qualification des données utilisés. Ces critères concernent la fiabilité et la représentativité des données. Il est à noter que cette étude est simplifiée dans l'objectif de ne pas alourdir le processus d'évaluation des impacts du cycle de vie, mais représente une excellente vue d'ensemble du type de données d'inventaire collectées.

**Tableau D-1 : Critères de qualification des données (quantités et processus)**

Pointages	Critères de qualification de la <u>fiabilité</u> des données (quantités)
1	Données vérifiées mesurées ou calculées sur le terrain - Cette donnée remplit le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude
2	Données vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou Données non vérifiées issues de mesures (documents fournis par le mandataire ou littérature) – cette donnée est jugée suffisamment précise/fiable par l'équipe d'analystes pour le cas à l'étude
3	Données non vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou Estimation de qualité (effectuée par un expert) – cette donnée est jugée utilisable par l'équipe d'analystes, mais sa fiabilité/précision pourrait être améliorée
4	Données estimées de façon grossière - Cette donnée ne remplit pas le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude
Pointages	Critères de qualification de la <u>représentativité</u> des données (processus)
1	Données de terrain (du cadre à l'étude), de laboratoire - Cette donnée remplit le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude
2	Bonne représentativité géographique et/ou technologique du processus sélectionné – cette donnée est jugée suffisamment représentative par l'équipe d'analystes pour le cas à l'étude
3	Données relatives au même procédé ou matériau, mais se référant à une technologie différente (ex. : processus représentatif disponible dans la banqueecoinvent) – Cette donnée est jugée utilisable par l'équipe d'analystes, mais sa représentativité pourrait être améliorée
4	Représentativité géographique et/ou technologique inadéquate. La donnée recherchée n'est pas facilement accessible, utilisation d'un autre processus comme approximation - Cette donnée ne remplit pas le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude

## D.2 Résultats – analyse de qualité des données

Le Tableau D-3 présente un résumé de l'évaluation de la qualité des données pour tous les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle, par MJ produit.

La qualité des données « fiabilité » fait référence à la quantification des flux (matière et énergie, distances de transport, quantités de rejets). La qualité des données « représentativité » fait plutôt référence à la validité géographique et technologique et la complétude des modules de données (processus) génériques sélectionnés. Enfin, la contribution potentielle à l'impact réfère à l'influence du processus ou du paramètre évalué sur les résultats (établit sur sa contribution moyenne aux différentes catégories de dommage à l'étude). Pour simplifier la lecture, un code de couleur a été ajouté et est présenté au Tableau D-2.

**Tableau D-2 : Critères de contribution et de qualité des données**

Contribution		Qualité	
0-5%	Contribution potentiellement faible ou négligeable	1	Remplit le critère pour le cas à l'étude
6-10%	Contribution potentiellement influente	2	Jugée suffisamment représentative
11-50%	Forte contribution potentielle	3	Jugée utilisable, mais pouvant être améliorée
51-100%	Très forte contribution potentielle	4	Ne remplit pas le critère pour le cas à l'étude

Rappelons que de manière générale, une note de « 1 » correspond à la meilleure évaluation possible, alors qu'une note de « 4 » correspond à une donnée qui devrait être améliorée afin de remplir les différents critères de qualité. Ainsi, les processus pour lesquels la qualité des données est considérée comme étant limitée ou insuffisante sont surlignées en rouge (note « 4 ») et les processus pouvant être améliorés sont en orangé (note « 3 »).

En ce qui a trait à la contribution, une plage de valeurs est présentée. Elle indique la contribution minimale et maximale du processus évalué en fonction des quatre catégories de dommages et des deux catégories d'impacts évaluées. La contribution globale du processus évalué (couleur de la case) a été établie en fonction de sa contribution maximale, tout indicateur confondu.

Il est à noter que lorsque la contribution globale d'un processus ou d'une étape du cycle de vie changeait de catégorie uniquement à cause d'un indicateur, celui-ci a été identifié au Tableau D-3.

### **Fiabilité**

Sur le plan de la fiabilité, la majorité des processus liés aux systèmes géothermiques ont été jugés suffisamment précis (notés « 2 »), car les quantités ont été adaptées au contexte québécois. Pour l'étape d'exploitation et la production du désurchauffeur les flux proviennent des processus génériques qui ont été mis à l'échelle et sont donc jugées un peu moins fiables (note de « 3 »).

Pour ce qui est des systèmes solaires, les quantités employées proviennent directement des données génériques suisses (sauf pour les distances de transport qui ont toujours été adaptées), ce qui a mené à une évaluation un peu moins fiable (note de « 3 »), mais toujours utilisable dans le cas à l'étude. Seul le système solaire chauffe-air est considéré plus fiable, notamment avec des données spécifiquement collectées auprès d'un distributeur québécois (ce qui a mené à des notes de « 1 » et « 2 »).

### **Représentativité**

Le choix des processus pour modéliser les systèmes géothermiques ont généralement été jugés applicables au Québec, puisque adaptés à partir d'informations provenant des fournisseurs locaux (notés « 2 ») ou à partir de données européennes posées applicables au contexte québécois (notés « 3 »). La gestion de fin de vie a majoritairement été jugée représentative (noté « 3 », car une adaptation a été effectuée pour remplacer l'incinération par l'enfouissement), mais pouvant être améliorée, puisqu'elle repose sur des processus d'enfouissement génériques européens qui ne sont pas entièrement adaptés au contexte

technologique québécois. Seul le cas du traitement des fluides caloporteurs en usine de traitement municipale a une applicabilité au contexte local qui est inconnue et a été noté « 4 ».

En ce qui a trait aux systèmes solaires thermiques à circulation de fluides, les processus génériques suisses ont été employés et posés représentatifs des systèmes vendus au Québec, mais ces données pourraient certainement être améliorées (d'où la note de « 3 »). Pour le système solaire chauffe-air, il a été entièrement modélisé par le CIRAIG, à partir de données génériques jugées applicables au Québec (noté « 2 »). Le commentaire sur la représentativité des processus de fin de vie des systèmes géothermique s'applique également pour les systèmes solaires.

**Tableau D-3 : Contribution des processus et qualité des données des systèmes de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle, par MJ produit**

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global du système	Qualité	
		Fiabilité (Quantité)	Représentativité (Processus)
<b>1A. Géothermie liquide-eau</b>	100%		
Production	8-40%	2	2
Installation	2-37%	2	2
Exploitation (1 seul processus)	21-89%	3	3
Gestion en fin de vie	0-4%	2	3
<b>Production</b>	100%		
Boucle souterraine verticale	8-47%	2	2
Pompe à chaleur liquide-eau	14-61%	2	2
Planchers radiants	30-53%	2	3
Réservoir à eau chaude	1-1%	3	3
<b>Installation</b>	100%		
Système boucle-pompe	43-78%	2	2
Planchers radiants	22-57%	3	3
Réservoir à eau chaude	0-0,2%	2	2
<b>Gestion en fin de vie</b>	100%		
Système boucle-pompe	3-83%	2	4
Planchers radiants	17-97%	2	3
Réservoir à eau chaude	0-1,6%	2	3
<b>1B. Géothermie liquide-air</b>	100%		
Production	12-46%	2	2
Installation	1-33%	2	2
Exploitation (1 seul processus)	28-88%	3	3
Gestion en fin de vie	0-4%	2	3
<b>Production</b>	100%		
Boucle souterraine verticale	5-57%	2	2
Pompe à chaleur liquide-air	17-43%	2	2
Système ventilation air pulsé	25-64%	2	3
Réservoir à eau chaude	1-1%	3	3
<b>Installation</b>	100%		
Système ventilation air pulsé	0-1%	2	2
Système boucle-pompe	98-100%	3	3
Réservoir à eau chaude	0,1-0,4%	2	2
<b>Gestion en fin de vie</b>	100%		
Boucle souterraine verticale	0-47%	2	3
Pompe à chaleur liquide-air	37-99%	2	3
Système de ventilation air pulsé	1-35%	2	3
Réservoir à eau chaude	0-21%	2	3

seul QÉ > 45%

seul CC > 46%

Seul QÉ > 33%

seul EA > 33%

Seul EA > 2 %

Tableau D-3 (suite)

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global du système	Qualité	
		Fiabilité (Quantité)	Représentativité (processus)
<b>2A. Solaire thermique à collecteur plats</b>	100%		
Production	32-80%	3	3
Installation (1 seul processus)	5-17%	3	3
Exploitation (1 seul processus)	6-47%	3	3
Gestion en fin de vie	0-16%	3	3
<b>Production</b>	100%		
Réservoir eau chaude et échangeur chaleur	33-60%	3	3
Collecteur plat solaire	37-66%	3	3
Pompe à eau	1-2%	3	3
Réservoir d'expansion	1-1%	3	3
<b>Gestion en fin de vie</b>	100%		
Réservoir eau chaude et échangeur chaleur	6-77%	3	3
Collecteur plat solaire	22-94%	3	4
Pompe à eau	0-1%	3	3
Réservoir d'expansion	0-2%	3	3
<b>2B. Solaire thermique à tubes sous vide</b>	100%		
Production	38-85%	3	3
Installation	5-15%	3	3
Exploitation (1 seul processus)	3-40%	3	3
Gestion en fin de vie	1-16%	3	3
<b>Production</b>	100%		
Réservoir eau chaude et échangeur chaleur	30-52%	3	3
Pompe à eau	0-1%	3	3
Réservoir d'expansion	0-1%	3	3
Système à tubes sous-vide	28-54%	3	3
Planchers radiants	8-21%	3	3
<b>Installation</b>	100%		
Système à tubes sous-vide	34-77%	3	3
Planchers radiants	23-66%	3	3
<b>Gestion en fin de vie</b>	100%		
Réservoir eau chaude et échangeur chaleur	10-33%	3	3
Système à tubes sous-vide	14-86%	3	3
Pompe à eau	0-0,1%	3	3
Réservoir d'expansion	1-27%	3	3
Planchers radiants	4-46%	3	3

seul EA > 1%

Seul QÉ > 38 %

seul EA > 2%

seul EA> 45%

Seul EA > 31%

**Tableau D-3 (suite et fin)**

Étape du cycle de vie / Processus	Contribution à l'impact global du système	Qualité	
		Fiabilité (Quantité)	Représentativité (processus)
<b>2C. Solaire thermique chauffe-air</b>	100%		
Production	27-76%	2	2
Installation (1 seul processus)	2-17%	1	2
Exploitation (1 seul processus)	11-70%	1	1
Gestion en fin de vie	0-0,4%	2	3
<b>Production</b>	100%		
Capteur chauffe-air ESOLAIR	43-82%	1	2
Système de ventilation	10-49%	3	2
Contrôleur différentiel	3-8%	3	3
<b>Gestion en fin de vie</b>	100%		
Capteur chauffe-air ESOLAIR	37-84%	1	2
Système de ventilation	6-11%	3	3
Contrôleur différentiel	9-52%	3	3

Seul QÉ > 26%

seul CC > 44%



**Annexe E :**  
**Résultats bruts**

---

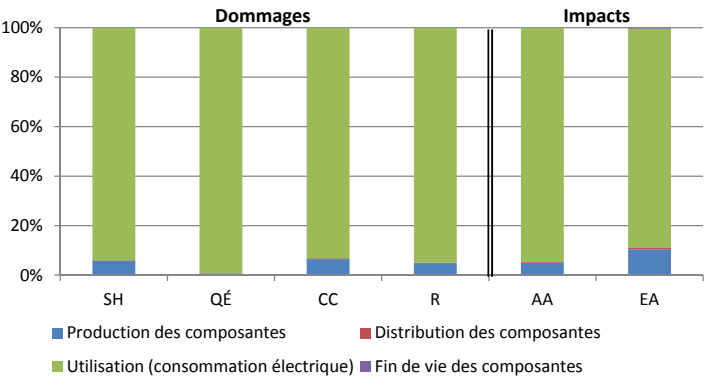
Profil - Système de chauffage électrique de référence (MJ)

Résumé des résultats - chauffage air et eau (/MJ):

Damage category	Unit	Total	Production (composante s)	Distribution (composante s)	Utilisation (consommati n électrique)	Fin de vie
Human health	DALY	8,68E-09	5,06E-10	2,07E-11	8,16E-09	3,55E-13
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	1,77E-04	7,97E-06	2,42E-02	1,01E-06
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	4,55E-04	1,83E-05	6,51E-03	3,03E-07
Resources	MJ primary	1,49E-01	7,24E-03	2,97E-04	1,41E-01	4,39E-06
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	2,04E-06	1,31E-07	3,86E-05	2,05E-09
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	1,36E-08	1,06E-09	1,16E-07	5,86E-10

	Production des composantes	Distribution des composantes	Utilisation (consommati on électrique)	Fin de vie des composantes	
SH	6%	0,2%	94%	0,0%	total
QÉ	1%	0,0%	99%	0,0%	100,00%
CC	7%	0,3%	93%	0,0%	100,00%
R	5%	0,2%	95%	0,0%	100,00%
AA	5%	0,3%	95%	0,0%	100,00%
EA	10%	0,8%	88%	0,4%	100,00%

MIN	1%	0%	88%	0%
MAX	10%	1%	99%	0%



## Profil - kWh d'électricité du réseau d'Hydro-Québec

Résumé des résultats (/kWh): pertes 1,01 1,055

Damage category	Unit	Total	Production et importation (grid mix)	Transmission - haute tension	Transmission - moyenne tension	Distribution
Human health	DALY	2,94E-08	1,09E-08	5,26E-10	2,07E-09	1,58E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	8,72E-02	1,94E-03	1,78E-04	1,17E-02	7,34E-02
Climate change	kg CO2 eq	2,34E-02	1,26E-02	1,37E-03	5,19E-03	4,28E-03
Resources	MJ primary	5,09E-01	4,29E-01	7,38E-03	9,29E-03	6,27E-02
Aquatic acidification	kg SO2 eq	1,39E-04	4,49E-05	2,57E-06	1,10E-05	8,04E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	4,16E-07	2,60E-07	1,13E-08	2,13E-08	1,23E-07

	Production et importation (grid mix)	Transmission - haute tension	Transmission - moyenne tension	Distribution	total
SH	37%	2%	7%	54%	100,00%
QÉ	2%	0%	13%	84%	100,00%
CC	54%	6%	22%	18%	100,00%
R	84%	1%	2%	12%	100,00%
AA	32%	2%	8%	58%	100,00%
EA	63%	3%	5%	30%	100,00%

MIN	2%	0%	2%	12%
MAX	84%	6%	22%	84%

### Contribution

1- Particules, SO2 et NOx issues de la production d'élec au charbon et de la production de Cu pour les câbles

2- Arsenic des poteaux

1- Cu, Cr du lessivage du traitement des poteaux

2- Al de la production de Cu pour la production des câbles de distribution

3- Cu, Cr émis par le réseau de transmission

1- Production d'électricité à partir de charbon, gaz naturel, industriel gas...

2- SF6 dans la transmission et production des métaux des infrastructures dans la distribution

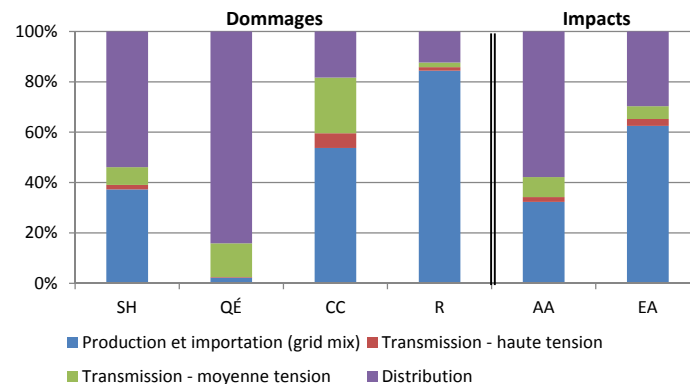
1- Extraction d'uranium pour la production nucléaire

2- Extraction de charbon pour la prod électrique à partir de charbon

1- SO2 de la combustion de charbon et la production de cuivre

2- NOx de la combustion de charbon pour la prod d'électricité

1- DCO de l'extraction de pétrole pour la production d'électricité



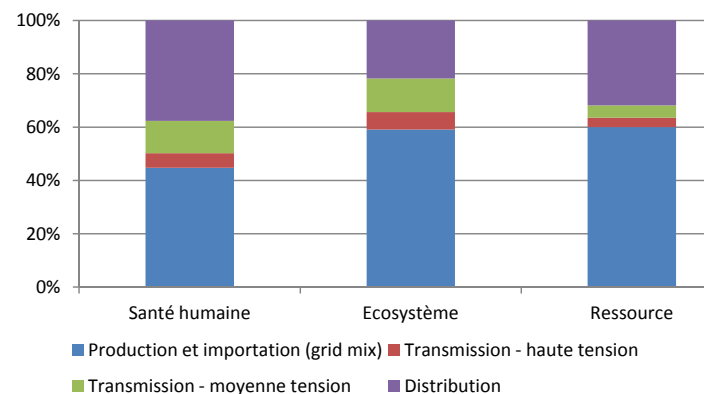
## Profil - kWh d'électricité du réseau d'Hydro-Québec, vérification avec la méthode ReCiPe

Vérification de la contribution de l'étape de distribution à l'indicateur Ecosystem

Résumé des résultats (/kWh):		pertes			1,01	1,055
			Production et importation (grid mix)	Transmissi on - haute tension	Transmissi on - moyenne tension	Distributio n
Damage category	Unit	Total				
Human health	DALY	6,42E-08	2,88E-08	3,49E-09	7,79E-09	2,42E-08
Ecosystem	species*yr	2,76E-10	1,63E-10	1,80E-11	3,47E-11	6,01E-11
Resources	\$	7,05E-02	4,23E-02	2,50E-03	3,25E-03	2,24E-02

	Production et importation (grid mix)	Transmission - haute tension	Transmission - moyenne tension	Distribution	total
Santé humaine	<b>45%</b>	<b>5%</b>	<b>12%</b>	<b>38%</b>	100,00%
Ecosystème	<b>59%</b>	<b>7%</b>	<b>13%</b>	<b>22%</b>	100,00%
Ressource	<b>60%</b>	<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>32%</b>	100,00%
MIN	45%	4%	5%	22%	
MAX	60%	7%	13%	38%	

Dommages, Méthode ReCiPe



Selon la méthode ReCiPe, l'étape de distribution ne ressort pas dans l'indicateur "Ecosystèmes", comme c'est le cas avec la méthode IMPACT 2002+.

Bien que le réseau de distribution et de transmission moyenne tension soit un fort contributeur à la catégorie d'impact "Terrestrial ecotoxicity" à cause des métaux, l'agrégation en dommage ne fait pas particulièrement ressortir cette étape du cycle de vie.

## Profil - Systèmes de production décentralisé d'énergie thermique, par MJ

### 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution) (of project autoproduction)

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
Indicator: Damage assessment  
Unit: %  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processe: No  
Exclude long-term emissions: No  
Per impact category: No  
Sorted on item: Damage category  
Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution)	P10. Boucle souterraine verticale en circuit fermé	P22. Pompe à chaleur eau- eau	P32. Planchers radiants - distribution de la chaleur	P40. Réservoir à eau chaude, 60 gallons	I00. Système boucle- pompe	I32. Planchers radiants	I40. Réservoir à eau chaude	E02. Système géothermique eau-eau	G02. Pompe à chaleur eau- eau	G10. Boucle souterraine verticale en circuit fermé, obturation	G32. Planchers radiants	G40. Réservoir à eau chaude
Human health	DALY	<b>4,88E-09</b>	0	2,13E-10	6,98E-10	6,03E-10	2,15E-11	8,93E-10	2,52E-10	8,01E-13	2,15E-09	1,63E-12	2,54E-13	4,08E-11	3,93E-14
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	<b>6,97E-03</b>	0	4,59E-05	0,000344	0,000168	7,99E-06	7,25E-05	9,69E-05	3,09E-07	0,006219	6,11E-07	7,69E-07	1,30E-05	7,03E-08
Climate change	kg CO2 eq	<b>5,22E-03</b>	0	0,000231	0,000462	0,000815	1,59E-05	0,000468	0,000223	7,10E-07	0,002794	0,000173	0,00E+00	3,58E-05	3,41E-08
Resources	MJ primary	<b>7,47E-02</b>	0	0,007417	0,006531	0,012143	0,000261	0,00714	0,003617	1,15E-05	0,036857	2,40E-05	0	6,82E-04	5,19E-07
Aquatic acidification	kg SO2 eq	<b>2,51E-05</b>	0	1,34E-06	3,41E-06	3,67E-06	7,91E-08	4,50E-06	1,59E-06	5,06E-09	1,02E-05	1,17E-08	0,00E+00	2,49E-07	2,36E-10
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	<b>1,47E-07</b>	0	2,79E-08	8,37E-09	2,24E-08	3,95E-10	4,18E-08	1,29E-08	4,12E-11	3,06E-08	1,03E-10	0,00E+00	2,27E-09	3,81E-11

#### Répartition des impacts par étapes du CV

	Productio n	Distributi on	Utilisatio n	Fin de vie	
SH	32%	23%	44%	1%	100%
QÉ	8%	2%	89%	0%	100%
CC	29%	13%	54%	4%	100%
R	35%	14%	49%	1%	100%
	Production	Distributio	Utilisation	Fin de vie	
AA	34%	24%	41%	1%	100%
EA	40%	37%	21%	2%	100%

### 1 MJ 1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 MJ 1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
Indicator: Damage assessment  
Unit: %  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processe: No  
Exclude long-term emissions: No  
Per impact category: No  
Sorted on item: Damage category  
Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution)	P10. Boucle souterraine verticale en circuit fermé	P21. Pompe à chaleur eau-air (climatisation directe)	P31. Système de ventilation à air pulsé	P40. Réservoir à eau chaude, 60 gallons	I31. Système de ventilation à air pulsé	I00. Système boucle-pompe	I40. Réservoir à eau chaude	E01. Système géothermique eau-air (climatisation directe)	G10. Boucle souterraine verticale en circuit fermé, obturation	G01. Pompe à chaleur eau-air	G31. Système de ventilation à air pulsé	G40. Rése rvoir à eau chaude
Human health	DALY	<b>4,95E-09</b>	0	2,13E-10	6,98E-10	7,05E-10	2,15E-11	2,13E-12	8,93E-10	8,01E-13	2,41E-09	2,54E-13	1,63E-12	1,04E-12	3,93E-14
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	<b>0,007923</b>	0	4,59E-05	0,000344	0,000515	7,99E-06	8,21E-07	7,25E-05	3,09E-07	0,006935	7,69E-07	6,11E-07	1,94E-07	7,03E-08
Climate change	kg CO2 eq	<b>0,00485</b>	0	0,000231	0,000462	0,000482	1,59E-05	1,89E-06	0,000468	7,10E-07	0,003014	0,00E+00	0,000173	1,52E-06	3,41E-08
Resources	MJ primary	<b>0,071012</b>	0	0,007417	0,006531	0,008001	0,000261	3,06E-05	0,00714	1,15E-05	0,041584	0,00E+00	2,40E-05	1,08E-05	5,19E-07
Aquatic acidification	kg SO2 eq	<b>2,94E-05</b>	0	1,34E-06	3,41E-06	8,58E-06	7,91E-08	1,34E-08	4,50E-06	5,06E-09	1,15E-05	0,00E+00	1,17E-08	4,37E-09	2,36E-10
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	<b>1,26E-07</b>	0	2,79E-08	8,37E-09	1,22E-08	3,95E-10	1,09E-10	4,18E-08	4,12E-11	3,53E-08	0,00E+00	1,03E-10	4,15E-11	3,81E-11

#### Répartition des impacts par étapes du CV

	Productio n	Distributi on	Utilisatio n	Fin de vie	
SH	33%	18%	49%	0%	100%
QÉ	12%	1%	88%	0%	100%
CC	25%	10%	62%	4%	100%
R	31%	10%	59%	0%	100%
	Production	Distributio	Utilisation	Fin de vie	
AA	46%	15%	39%	0%	100%
EA	39%	33%	28%	0%	100%

# 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)

Calculation:	Analyze
Results:	Impact assessment
Product:	1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processe	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	Total	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution)	P40_ Réservoir à eau chaude, 60 gallons	P211_ Collecteur solaire plat	P220_ Pompe à eau 40W	P230_ Réservoir d'expansion	P201_ Système solaire thermique (collecteurs plats)	E21_ Système solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats	G40_ Réservoir à eau chaude	G211_ Collecteur solaire plat (prod eau chaude)	G220_ Pompe à eau 40W	G230_ Réservoir d'expansion
Human health	DALY	1,19E-08	0,00E+00	5,33E-09	3,95E-09	1,71E-10	6,83E-11	1,63E-09	6,89E-10	9,72E-12	1,54E-11	3,11E-13	4,45E-13
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	6,54E-03	0,00E+00	1,98E-03	1,99E-03	8,71E-05	2,29E-05	9,20E-04	1,53E-03	1,74E-05	4,88E-06	1,19E-07	1,52E-07
Climate change	kg CO2 eq	8,36E-03	0,00E+00	3,93E-03	2,44E-03	7,66E-05	7,33E-05	9,60E-04	8,16E-04	8,43E-06	5,17E-05	2,82E-07	4,66E-07
Resources	MJ primary	1,39E-01	0,00E+00	6,45E-02	3,97E-02	1,27E-03	1,33E-03	1,64E-02	1,54E-02	1,28E-04	2,37E-04	4,49E-06	6,58E-06
Aquatic acidification	kg SO2 eq	5,46E-05	0	1,96E-05	2,11E-05	6,40E-07	3,24E-07	9,19E-06	3,64E-06	5,84E-08	1,10E-07	2,04E-09	3,79E-09
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lii	9,31E-07	0	9,76E-08	1,98E-07	1,72E-09	2,19E-09	4,60E-08	4,34E-07	9,42E-09	1,42E-07	1,66E-11	1,26E-10

Répartition des impacts par étapes du CV					
	Productio n	Distributi on	Utilisatio n	Fin de vie	
SH	80%	14%	6%	0%	100%
QÉ	62%	14%	23%	0%	100%
CC	78%	11%	10%	1%	100%
R	77%	12%	11%	0%	100%
	Production	Distributio	Utilisation	Fin de vie	
AA	76%	17%	7%	0%	100%
EA	32%	5%	47%	16%	100%

# 1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution) (of project autoproduction)

Calculation:	Analyze
Results:	Impact assessment
Product:	1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processe	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	Total	2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution)	P300_ Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur	P320_ Pompe à eau 40W	P330_ Réservoir d'expansion	P312_ Collecteur solaire à tubes	P340_ Planchers radiants - distribution de la chaleur	I302_ Système solaire thermique combiné (collecteur à tube)	I340_ Planchers radiants	E32_ Système solaire thermique combiné à collecteurs tubes	G300_ Réservoir à eau chaude et échangeur de chaleur	G312_ Collecteurs solaires à tube	G320_ Pompe à eau 40W	G330_ Réservoir d'expansion	G340_ Planchers radiants
Human health	DALY	1,24E-08	0	5,33E-09	1,06E-10	4,24E-11	3,63E-09	1,22E-09	9,48E-10	5,08E-10	4,24E-10	2,75E-11	2,62E-11	2,41E-13	4,24E-11	8,24E-11
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,006274	0	0,002027	5,41E-05	1,42E-05	0,001993	0,00034	0,000668	1,96E-04	9,00E-04	2,66E-05	1,29E-05	9,21E-08	1,42E-05	2,62E-05
Climate change	kg CO2 eq	0,009432	0	0,003989	4,76E-05	4,55E-05	0,002244	0,001647	0,000287	4,50E-04	5,23E-04	2,39E-05	5,69E-05	2,19E-07	4,55E-05	7,23E-05
Resources	MJ primary	0,155871	0	0,06578	0,000786	0,000825	0,038708	0,024544	0,005144	7,31E-03	0,009747	3,82E-04	4,38E-04	3,48E-06	0,000825	0,001378
Aquatic acidification	kg SO2 eq	5,87E-05	0	1,92E-05	3,97E-07	2,01E-07	1,94E-05	7,41E-06	5,31E-06	3,21E-06	2,27E-06	1,70E-07	3,91E-07	1,58E-09	2,01E-07	5,03E-07
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lii	7,59E-07	0	8,63E-08	1,07E-09	1,36E-09	1,57E-07	4,52E-08	1,32E-08	2,61E-08	3,05E-07	1,18E-08	1,06E-07	1,28E-11	1,36E-09	4,59E-09

Répartition des impacts par étapes du CV					
	Productio n	Distributi on	Utilisatio n	Fin de vie	
SH	83%	12%	3%	1%	100%
QÉ	71%	14%	14%	1%	100%
CC	85%	8%	6%	2%	100%
R	84%	8%	6%	2%	100%
	Production	Distributio	Utilisation	Fin de vie	
AA	79%	15%	4%	2%	100%
EA	38%	5%	40%	16%	100%

# 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)

Calculation: Analyze  
Results: Impact assessment  
Product: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
Indicator: Damage assessment  
Unit: %  
Skip categories: Never  
Exclude infrastructure processe No  
Exclude long-term emissions: No  
Per impact category: No  
Sorted on item: Damage category  
Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	2C_Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)	P11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0 (production et transport des composantes vers l'assemblage)	P12_Sys. de ventilation (distribution de l'air : conduites, filtre (à l'entrée), ventilateur (à la sortie))	P13_Contrôleur différentiel et filage (modélisé à partir d'une donnée générique pour sys. ventilation)	I101_Système de captage solaire à air	E11_Système solaire thermique à collecteurs chauffe-air (estimation de l'utilisation 2000h/an) * corrigé*	G11_Capteur chauffe-air ESOLAIR 2.0	G12_Système de ventilation	G13_Contrôleur
Human health	DALY	<b>2,83E-09</b>	0	1,30E-09	4,90E-10	1,02E-10	2,46E-10	6,82E-10	5,07E-12	6,83E-13	4,43E-12
Ecosystem quality	PDF*m2*yi	<b>0,002811</b>	0	0,000335	0,000381	5,56E-05	5,87E-05	1,98E-03	1,66E-06	1,37E-07	3,54E-07
Climate change	kg CO2 eq	<b>0,002809</b>	0	1,57E-03	0,000299	6,21E-05	3,13E-04	5,51E-04	4,40E-06	1,35E-06	6,30E-06
Resources	MJ primary	<b>0,046173</b>	0	0,023173	0,004875	0,00108	0,005012	0,011926	8,30E-05	8,01E-06	1,65E-05
Aquatic acidification	kg SO2 eq	<b>1,93E-05</b>	0	<b>7,86E-06</b>	<b>6,29E-06</b>	<b>5,45E-07</b>	<b>1,37E-06</b>	<b>3,22E-06</b>	<b>3,17E-08</b>	<b>3,63E-09</b>	<b>5,67E-09</b>
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	<b>9,32E-08</b>	0	<b>5,52E-08</b>	<b>7,07E-09</b>	<b>5,22E-09</b>	<b>1,55E-08</b>	<b>9,96E-09</b>	<b>2,75E-10</b>	<b>2,27E-11</b>	<b>3,03E-11</b>

## Répartition des impacts par étapes du CV

	Productio n	Distributi on	Utilisatio n	Fin de vie	
SH	67%	9%	24%	0,4%	100%
QÉ	27%	2%	70%	0,1%	100%
CC	69%	11%	20%	0,4%	100%
R	63%	11%	26%	0,2%	100%
	Production	Distributio	Utilisation	Fin de vie	
AA	76%	7%	17%	0,2%	100%
EA	72%	17%	11%	0,4%	100%

## 1A. Géothermie liquide-eau - Scénario chauffage résidentiel

*Note: Dans ce scénario, 95% de la demande énergétique pour le chauffage de l'air et fourni par le système géothermique, de même que 7% du chauffage de l'eau. Le reste est fourni par l'électricité du réseau (directement au système de chauffage géothermique et via un système d'appoint pour l'eau (chauffe eau électrique))*

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Characterization  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1A. Géothermie eau-eau + électricité	1A.1 Géothermie eau-eau , chauffage de l'air seulement	1A.2 Géothermie eau-eau, chauffage de l'eau seulement	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Carcinogens	kg C2H3Cl	9,83E-05	0	9,03E-05	5,22E-07	7,50E-06
Non-carcinogens	kg C2H3Cl	0,00027	0	0,000239428	1,63E-06	2,90E-05
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	5,59E-06	0	5,13E-06	3,02E-08	4,31E-07
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0,237177	0	0,20242715	1,42E-03	0,033326192
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,65E-08	0	4,61E-08	3,39E-10	2,77E-11
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,96E-06	0	1,85E-06	9,45E-09	9,22E-08
Aquatic ecotoxicity	kg TEG wat	1,643617	0	1,3972967	0,01011076	0,23620914
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0,94673	0	0,80936424	0,005759956	0,13160596
Terrestrial acid/nutrient	kg SO2 eq	0,000111	0	1,04E-04	5,58E-07	6,35E-06
Land occupation	m2org. area	3,45E-05	0	3,01E-05	1,75E-07	4,26E-06
<b>Aquatic acidification</b>	<b>kg SO2 eq</b>	<b>2,58E-05</b>	<b>0</b>	<b>2,37E-05</b>	<b>1,37E-07</b>	<b>1,89E-06</b>
<b>Aquatic eutrophication</b>	<b>kg PO4 P-li</b>	<b>1,46E-07</b>	<b>0</b>	<b>1,39E-07</b>	<b>7,65E-10</b>	<b>6,25E-09</b>
Global warming	kg CO2 eq	0,005295	0	0,004940947	2,90E-05	0,00032486
Non-renewable energy	MJ primary	0,077589	0	0,070419419	0,000406101	0,006763743
Mineral extraction	MJ surplus	0,000325	0	0,000271163	1,59E-06	5,27E-05

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	1A. Géothermie eau-eau + électricité	1A.1 Géothermie eau-eau , chauffage de l'air seulement	1A.2 Géothermie eau-eau, chauffage de l'eau seulement	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Human health	DALY	<b>5,05E-09</b>	0	4,61E-09	2,79E-11	4,11E-10
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	<b>7,72E-03</b>	0	0,00661324	4,68E-05	0,001064107
Climate change	kg CO2 eq	<b>5,29E-03</b>	0	0,004940947	2,90E-05	0,00032486
Resources	MJ primary	<b>7,79E-02</b>	0	0,070690582	0,000407693	0,00681646



## 1B. Géothermie liquide-air - Scénario chauffage résidentiel

*Note: Dans ce scénario, 95% de la demande énergétique pour le chauffage de l'air et fourni par le système géothermique, de même que 7% du chauffage de l'eau. Le reste est fourni par l'électricité du réseau (directement au système de chauffage géothermique et via un système d'appoint pour l'eau (chauffe eau électrique))*

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 1B. Géothermie eau-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Characterization  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	1B. Géothermie eau-air + électricité	1A.1 Géothermie eau-eau , chauffage de l'air seulement	1B.2 Géothermie eau-air, chauffage de l'eau seulement	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Carcinogens	kg C2H3Cl e	9,83E-05	0	9,03E-05	5,73E-07	7,50E-06
Non-carcinogens	kg C2H3Cl e	0,00027	0	0,000239428	1,76E-06	2,90E-05
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	5,60E-06	0	5,13E-06	3,21E-08	4,31E-07
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0,237338	0	0,20242715	1,59E-03	0,033326192
Ozone layer depletion	kg CFC-11 e	4,65E-08	0	4,61E-08	3,39E-10	2,77E-11
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,96E-06	0	1,85E-06	9,86E-09	9,22E-08
Aquatic ecotoxicity	kg TEG wat	1,644739	0	1,3972967	0,011232889	0,23620914
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0,947348	0	0,80936423	0,00637784	0,13160596
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,000111	0	1,04E-04	5,86E-07	6,35E-06
Land occupation	m2org.arat	3,45E-05	0	3,01E-05	2,08E-07	4,26E-06
<b>Aquatic acidification</b>	<b>kg SO2 eq</b>	<b>2,58E-05</b>	<b>0</b>	<b>2,37E-05</b>	<b>1,46E-07</b>	<b>1,89E-06</b>
<b>Aquatic eutrophication</b>	<b>kg PO4 P-li</b>	<b>1,46E-07</b>	<b>0</b>	<b>1,39E-07</b>	<b>7,97E-10</b>	<b>6,25E-09</b>
Global warming	kg CO2 eq	0,005296	0	0,004940947	2,98E-05	0,00032486
Non-renewable energy	MJ primary	0,077622	0	0,070419418	0,000438964	0,006763743
Mineral extraction	MJ surplus	0,000326	0	0,000271163	1,72E-06	5,27E-05

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 1B. Géothermie eau-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	1B. Géothermie	1A.1 Géothermie	1B.2 Géothermie	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Human health	DALY	<b>5,05E-09</b>	0	4,61E-09	2,97E-11	4,11E-10
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	<b>7,73E-03</b>	0	0,00661324	5,18E-05	0,001064107
Climate change	kg CO2 eq	<b>5,30E-03</b>	0	0,004940947	2,98E-05	0,00032486
Resources	MJ primary	<b>7,79E-02</b>	0	0,070690582	0,000440685	0,00681646

## 2A. Solaire thermique à collecteurs plats - Scénario chauffage résidentiel

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Characterization  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution)	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère
Carcinogens	kg C2H3Cl e	0,000166	0	3,97E-05	2,14E-05	0,000105194
Non-carcinogens	kg C2H3Cl e	0,000635	0	7,25E-05	8,27E-05	0,000479298
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	9,40E-06	0	1,70E-06	1,23E-06	6,47E-06
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0,690903	0	0,02087184	0,095117038	0,57491396
Ozone layer depletion	kg CFC-11 e	6,15E-10	0	9,69E-11	7,89E-11	4,39E-10
Respiratory organics	kg C2H4 eq	2,07E-06	0	4,57E-07	2,63E-07	1,35E-06
Aquatic ecotoxicity	kg TEG wat	4,871224	0	0,096554625	0,67416986	4,1004998
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	2,73023	0	0,098379027	0,37561955	2,2562316
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,00014	0	2,67E-05	1,81E-05	9,48E-05
Land occupation	m2org.aral	9,43E-05	0	2,03E-05	1,21E-05	6,19E-05
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,21E-05	0	6,95E-06	5,39E-06	2,98E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lii	2,31E-07	0	1,19E-07	1,78E-08	9,45E-08
Global warming	kg CO2 eq	0,007084	0	0,001063713	0,000927191	0,005093229
Non-renewable energy	MJ primary	0,145182	0	0,017117573	0,019304552	0,10876022
Mineral extraction	MJ surplus	0,001216	0	0,000576776	0,00015046	0,000488886

Calculation:	Analyze
Results:	Impact assessment
Product:	1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processe	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	Total	2A. Solaire therm	2A. Solaire ther	Chauffage de l'i	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère
Human health	DALY	8,97E-09	0,00E+00	1,51E-09	1,17E-09	6,29E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yi	2,21E-02	0,00E+00	8,33E-04	3,04E-03	1,82E-02
Climate change	kg CO2 eq	7,08E-03	0,00E+00	1,06E-03	9,27E-04	5,09E-03
Resources	MJ primary	1,46E-01	0,00E+00	1,77E-02	1,95E-02	1,09E-01

## 2B. Solaire thermique à tubes sous vide - Scénario chauffage résidentiel

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Characterization  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure process: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Sorted on item: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité	2B.1 Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide, chauffage de l'air seulement	2B.2 Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide, chauffage de l'eau seulement	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère
Carcinogens	kg C2H3Cl	0,000179	0	3,35E-05	2,92E-05	2,57E-05	9,08E-05
Non-carcinogens	kg C2H3Cl	0,000624	0	5,75E-05	5,35E-05	9,94E-05	0,000413884
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	9,72E-06	0	1,44E-06	1,21E-06	1,48E-06	5,59E-06
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	0,640138	0	0,015693928	0,013660526	0,1143326	0,49645086
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	6,18E-10	0	8,20E-11	6,16E-11	9,49E-11	3,79E-10
Respiratory organics	kg C2H4 eq	2,19E-06	0	4,16E-07	2,90E-07	3,16E-07	1,16E-06
Aquatic ecotoxicity	kg TEG wat	4,4775	0	0,065890145	0,060371859	0,81036579	3,5408719
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	2,542108	0	0,07422008	0,06808039	0,45150229	1,9483056
Terrestrial acid/nutrient	kg SO2 eq	0,000148	0	2,53E-05	1,91E-05	2,18E-05	8,18E-05
Land occupation	m2org.arat	1,13E-04	0	2,33E-05	2,19E-05	1,46E-05	5,34E-05
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,31E-05	0	6,01E-06	4,87E-06	6,48E-06	2,57E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	2,51E-07	0	7,77E-08	7,00E-08	2,14E-08	8,16E-08
Global warming	kg CO2 eq	0,007222	0	0,000965434	0,000744236	0,001114503	0,004398115
Non-renewable energy	MJ primary	0,144929	0	0,015590242	0,012217012	0,023204461	0,093916847
Mineral extraction	MJ surplus	0,001318	0	0,000364453	3,51E-04	0,000180856	0,000422164

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure process: No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	2B. Solaire thermique	2B.1 Solaire thermique	2B.2 Solaire thermique	Chauffage de l'eau	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère
Human health	DALY	<b>9,19E-09</b>	0	1,27E-09	1,08E-09	1,41E-09	5,43E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	<b>2,06E-02</b>	0	0,000642154	0,000585274	0,003650646	0,015732197
Climate change	kg CO2 eq	<b>7,22E-03</b>	0	0,000965434	0,000744236	0,001114503	0,004398115
Resources	MJ primary	<b>1,46E-01</b>	0	0,015954695	0,012567858	0,023385317	0,094339011

## 2C. Solaire thermique chauffe-air - Scénario chauffage résidentiel

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Characterization  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infra: No  
 Exclude long: No  
 Sorted on iter: Impact category  
 Sort order: Ascending

Impact category	Unit	Total	2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité	2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)	Chauffage de l'air, à partir d'électricité, au calorifère	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Carcinogens	kg C2H3Cl	0,000141	0	9,09E-06	8,87E-05	4,36E-05
Non-carcinog	kg C2H3Cl	0,000589	0	1,65E-05	0,000403937	0,000168428
Respiratory ir	kg PM2.5 e	8,33E-06	0	3,70E-07	5,45E-06	2,51E-06
Ionizing radia	Bq C-14 eq	0,690264	0	0,011988242	0,48451868	0,19375693
Ozone layer d	kg CFC-11	5,60E-10	0	2,92E-11	3,70E-10	1,61E-10
Respiratory o	kg C2H4 eq	1,78E-06	0	1,06E-07	1,14E-06	5,36E-07
Aquatic ecoto	kg TEG wat	4,891185	0	0,062109239	3,4557671	1,373309
Terrestrial eci	kg TEG soil	2,706111	0	0,039482153	1,9014782	0,76515094
Terrestrial aci	kg SO2 eq	0,000127	0	1,01E-05	7,99E-05	3,69E-05
Land occupat	m2org.arat	8,21E-05	0	5,20E-06	5,21E-05	2,47E-05
Aquatic acidif	kg SO2 eq	3,84E-05	0	2,28E-06	2,51E-05	1,10E-05
Aquatic eutro	kg PO4 P-iii	1,27E-07	0	1,10E-08	7,96E-08	3,63E-08
Global warmi	kg CO2 eq	0,006512	0	0,000331273	0,004292407	0,001888723
Non-renewab	MJ primary	0,136386	0	0,005402187	0,091659559	0,039324087
Mineral extra	MJ surplus	0,000761	0	4,28E-05	0,000412017	0,000306493

Calculation: Analyze  
 Results: Impact assessment  
 Product: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infra: No  
 Exclude long: No  
 Per impact ca: No  
 Sorted on iter: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Total	2C. Solaire thermic	2C. Solaire thermic	Chauffage de l'air,	Chauffage de l'eau, chauffe-eau électrique de 60 gallons, à la sortie du chauffe-eau
Human health	DALY	8,03E-09	0,00E+00	3,33E-10	5,30E-09	2,39E-09
Ecosystem qu	PDF*m2*yi	2,19E-02	0,00E+00	3,32E-04	1,54E-02	6,19E-03
Climate chan	kg CO2 eq	6,51E-03	0,00E+00	3,31E-04	4,29E-03	1,89E-03
Resources	MJ primary	1,37E-01	0,00E+00	5,44E-03	9,21E-02	3,96E-02

## Comparaison des profils environnementaux - Scénario chauffage résidentiel, en incluant la fonction climatisation

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 p 1A. Géothermie liq.-eau + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Product 2: 1 p 1B. Géothermie liq.-air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Product 3: 1 p 2A. Sol. therm coll. plats + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Product 4: 1 p 2B. Sol. therm tubes sous vide + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Product 5: 1 p 2C. Sol. therm chauffe air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Product 6: 1 p Ref 100% électrique (chauffage et clim d'une résidence moyenne) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure prov: No  
 Exclude long-term emissio: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

		1A. Géothermie liq.-eau + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)	1B. Géothermie liq.-air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)	2A. Sol. therm coll. plats + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)	2B. Sol. therm tubes sous vide + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)	2C. Sol. therm chauffe air + Electricité (chauffage et clim d'une résidence moyenne)	Ref 100% électrique (chauffage et clim d'une résidence moyenne)
Damage category	Unit						
Human health	DALY	0,00053178	0,00045776	0,0008802	0,00089972	0,00079606	0,00085427
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	795,75822	712,90095	2070,9794	1939,7332	2051,7697	2276,6415
Climate change	kg CO2 eq	614,19377	481,74403	773,04206	785,30694	722,28613	763,97085
Resources	MJ primary	8312,7624	7080,1946	14392,475	14379,017	13571,177	14612,747
Aquatic acidification	kg SO2 eq	2,696079	2,3320206	4,1485001	4,2328681	3,8140012	4,0272761
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,01542875	0,01310875	0,02295181	0,02471372	0,01372885	0,01407144

### Chauffage seulement (analyse scénario sans climatisation)

24660 kWh/an pour le chauffage et l'eau chaude  
 88776 MJ/an

1A. Géothermie eau-eau + électricité	1B. Géothermie eau-air + électricité	2A. Solaire thermique à collecteurs plats + électricité	2B. Solaire thermique tubes sous- vide + électricité	2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité	Ref - 100% électricité
4,48E-04	4,48E-04	7,65E-04	8,16E-04	7,13E-04	7,71E-04
6,86E+02	6,86E+02	1,95E+03	1,83E+03	1,94E+03	2,17E+03
4,70E+02	4,70E+02	6,07E+02	6,41E+02	5,78E+02	6,20E+02
6,92E+03	6,92E+03	1,26E+04	1,30E+04	1,22E+04	1,32E+04
2,29E+00	2,29E+00	3,59E+00	3,82E+00	3,40E+00	3,62E+00
1,30E-02	1,30E-02	1,87E-02	2,23E-02	1,13E-02	1,16E-02

### Augmentation des impacts dus à la climatisation (par rapport au même système, sans climatisation)

1A	1B	2A	2B	2C	Ref
19%	2%	15%	10%	12%	11%
16%	4%	6%	6%	6%	5%
31%	2%	27%	22%	25%	23%
20%	2%	14%	11%	11%	11%
18%	2%	16%	11%	12%	11%
19%	1%	22%	11%	22%	21%

## Analyse de sensibilité - Méthode ReCiPe

Method: **ReCiPe Endpoint (H) V1.03 / World ReCiPe H/H**

		1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution)	1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution)	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution)	2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution)	2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)	Ref - 100%
Damage category	Unit						électricité
Human Health	DALY	1,64E-08	1,63E-08	2,26E-08	2,46E-08	6,51E-09	1,90E-08
Ecosystems	species.yr	7,74E-11	7,52E-11	8,77E-11	1,03E-10	2,81E-11	8,15E-11
Resources	\$	1,87E-02	0,01644749	0,0456032	0,0525991	1,31E-02	0,0221469

### Par rapport au réseau d'HQ

	1A. Géothermie liquide-eau	1B. Géothermie liquide-air	2A. Solaire thermique à collecteurs plats	2B. Solaire thermique à tubes sous-vide	2C. Solaire thermique à collecteurs à air vitrés
Santé humaine	100%	86%	86%	119%	130%
Écosystèmes	100%	95%	92%	108%	127%
Ressources	100%	84%	74%	206%	238%

Gain ou charge supplémentaire des technologies par rapport au réseau:

(valeurs négatives = charges environnementales supplémentaires)

	Géothermique	Géothermique	Solaire thermique à collecteurs à air	Solaire thermique à tubes sous-vide	Solaire thermique à collecteurs à air vitrés
Santé humaine	14%	14%	-19%	-30%	66%
Écosystèmes	5%	8%	-8%	-27%	65%
Ressources	16%	26%	-106%	-138%	41%

différence non significative (-)

Method: **ReCiPe Endpoint (H) V1.03 / World ReCiPe H/H**

		1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution)	1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution)	2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution)	2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution)	2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution)	Ref - 100%
Impact category	Unit						électricité
Climate change Human Health	DALY	1,22E-08	1,17E-08	1,23E-08	1,39E-08	4,03E-09	1,03E-08
Ozone depletion	DALY	8,74E-11	8,73E-11	2,04E-12	2,13E-12	6,31E-13	1,25E-12
Human toxicity	DALY	1,24E-09	1,43E-09	3,07E-09	3,09E-09	5,59E-10	3,40E-09
Photochemical oxidant formation	DALY	8,57E-13	7,02E-13	1,57E-12	1,86E-12	4,14E-13	9,20E-13
Particulate matter formation	DALY	2,79E-09	3,02E-09	7,25E-09	7,64E-09	1,90E-09	5,15E-09
Ionising radiation	DALY	3,39E-11	3,72E-11	2,58E-11	2,41E-11	1,61E-11	1,22E-10
Climate change Ecosystems	species.yr	6,92E-11	6,63E-11	6,95E-11	7,86E-11	2,29E-11	5,82E-11
Terrestrial acidification	species.yr	1,31E-13	1,61E-13	2,91E-13	3,08E-13	1,07E-13	2,22E-13
Freshwater eutrophication	species.yr	3,44E-15	4,06E-15	1,51E-14	1,67E-14	3,66E-15	7,02E-15
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	2,44E-13	2,70E-13	2,38E-13	2,18E-13	1,04E-13	8,19E-13
Freshwater ecotoxicity	species.yr	3,98E-15	3,64E-15	3,56E-14	3,61E-14	3,10E-15	7,87E-15
Marine ecotoxicity	species.yr	2,56E-17	2,69E-17	1,41E-16	1,41E-16	1,50E-17	6,39E-17
Agricultural land occupation	species.yr	1,66E-12	2,20E-12	7,61E-12	1,28E-11	2,25E-12	5,95E-12
Urban land occupation	species.yr	1,62E-12	1,62E-12	5,02E-12	5,86E-12	9,01E-13	4,05E-12
Natural land transformation	species.yr	4,53E-12	4,63E-12	5,02E-12	5,27E-12	1,93E-12	1,22E-11
Metal depletion	\$	1,74E-04	0,00020217	0,001036871	0,00096006	7,27E-05	0,0005168
Fossil depletion	\$	1,85E-02	0,01624532	0,04456633	0,05163905	0,01306755	0,0216301

## Analyse de sensibilité - Contexte énergétique du lieu d'installation

Dans cette analyse, l'électricité consommée à l'étape d'utilisation a été changée de Qc à un mélange d'approvisionnement moyen pour l'Amérique du Nord.

### AS - Par MJ produit - variation du grid mix (avril 2013)

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 MJ Ref - 100% électricité (of project autoproduction)
Product 2:	1 MJ 1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Product 3:	1 MJ 1B. Géothermie eau-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Product 4:	1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Product 5:	1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Product 6:	1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure proc	No
Exclude long-term emission	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	Ref - 100%	1A. Géothermie	1B. Géothermie	2A. Solaire	2B. Solaire	2C. Solaire	Solaire thermique	Différence
Human health	DALY	1,04E-07	2,94E-08	3,23E-08	1,76E-08	1,58E-08	1,06E-08		
Ecosystem quality	PDF*m2*y	0,034182	0,009477	0,010716	0,007133	0,006618	0,00361		
Climate change	kg CO2 eq	0,196457	0,053801	0,058986	0,019758	0,016097	0,018277		
Resources	MJ primary	3,396442	0,907392	0,998887	0,334422	0,270117	0,311281		
Aquatic acidification	kg SO2 eq	8,42E-04	0,00023	0,000258	0,000103	8,69E-05	8,47E-05		
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	1,73E-06	5,56E-07	5,82E-07	1,03E-06	8,15E-07	2,24E-07		

1A. Géothermie	1B. Géothermie	2A. Solaire	2B. Solaire	2C. Solaire	Solaire thermique
72%	69%	83%	85%	90%	
72%	69%	79%	81%	89%	différence no
73%	70%	90%	92%	91%	
73%	71%	90%	92%	91%	
73%	69%	88%	90%	90%	
68%	66%	41%	53%	87%	

## Analyse de sensibilité - Rendement des systèmes géothermiques

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

Cellules orangées: indique que le système décentralisé est préférable au scénario de référence

### AS - Par MJ produit, avec variation du COP liquide-eau (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure pro No  
 Exclude long-term emissio No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	1,5	2	2,5	3	3,5	3,9 (base)	4	4,5	5	5,5
Human health	DALY	8,22E-09	6,86E-09	6,05E-09	5,50E-09	5,11E-09	4,88E-09	4,82E-09	4,60E-09	4,42E-09	4,27E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*y	0,016906	0,012869	0,010447369	0,008832725	0,007679	0,00697	0,006814	0,006142	0,005603	0,005163
Climate change	kg CO2 eq	0,007888	0,006803	0,006152125	0,005718248	0,005408	0,005218	0,005176	0,004995	0,00485	0,004732
Resources	MJ primary	0,132668	0,109112	0,094978589	0,085556131	0,078826	0,074684	0,073778	0,069852	0,066711	0,064141
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,09E-05	3,45E-05	3,06E-05	2,80E-05	2,62E-05	2,51E-05	2,48E-05	2,38E-05	2,29E-05	2,22E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	1,94E-07	1,75E-07	1,63E-07	1,56E-07	1,50E-07	1,47E-07	1,46E-07	1,43E-07	1,40E-07	1,38E-07

Avec écart significatif			
point de bascule (COP)	-	+	
<1,5	<1,5	2<x<2,5	géothermie mieux avec COP >2
<1,5			
2<x<2,5	1,5<x<2	2<x<2,5	géothermie mieux avec COP >2,5
<1,5	<1,5	<1,5	géothermie mieux dès que COP =
<1,5	<1,5	2,5<x<3	géothermie mieux avec COP >2,5
> 5,5	2<x<2,5	>5,5	géothermie équivalent à référence

### AS - Scénarios chauffage résidence moyenne avec variation du COP liq-eau (sept 2012)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 1A. Géothermie eau-eau + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure pro No  
 Exclude long-term emissio No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	1,5	2	2,5	3	3,9	4	4,5	5	5,5
Human health	DALY	8,25E-09	6,95E-09	6,17E-09	5,65E-09	5,05E-09	5,00E-09	4,78E-09	4,61E-09	4,47E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*y	0,017233	0,01337	0,011052339	0,009507126	0,007724	0,007576	0,006932	0,006417	0,005995
Climate change	kg CO2 eq	0,00785	0,006812	0,006189138	0,005773917	0,005295	0,005255	0,005082	0,004943	0,00483
Resources	MJ primary	0,133406	0,110863	0,097336593	0,088319302	0,077915	0,077048	0,07329	0,070285	0,067825
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,09E-05	3,48E-05	3,11E-05	2,86E-05	2,58E-05	2,55E-05	2,45E-05	2,37E-05	2,30E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	1,91E-07	1,73E-07	1,62E-07	1,55E-07	1,46E-07	1,45E-07	1,42E-07	1,40E-07	1,38E-07

Avec écart significatif			
point de bascule (COP)	-	+	
<1,5	<1,5	2,5<x<3	géothermie mieux avec COP >2,5
<1,5			
1,5<x<2	<1,5	2<x<2,5	géothermie mieux avec COP >2
<1,5	<1,5	<1,5	géothermie mieux dès que COP = ou > 1,5
1,5<x<2	<1,5	3,0	géothermie mieux dès que COP > 3
> 5,5	2<x<2,5	>5,5	géothermie équivalent à référence



## Analyse de sensibilité - rendement du système solaire à collecteurs plats

Conditions d'ensoleillement obtenues par le logiciel RETScreen 4.1

	Lieu	Ensoleillement annuel moyen		Évaluation du rendement en fonction des kWh/m².an produit		
		kWh/m².j	MWh/m².a	539	600	700
Minimum	Blanc Sablon	2,93	1,07	50%	56%	65%
	La Grande	3,00	1,09	49%	55%	64%
	Nitchequon2	3,09	1,13	48%	53%	62%
	Manovane Est	3,19	1,16	46%	52%	60%
	Jonquière	3,30	1,20	45%	50%	58%
	Lac Mégantic	3,40	1,24	43%	48%	56%
	Montréal airport	3,52	1,29	42%	47%	54%
	Mirabel	3,57	1,30	41%	46%	54%
	Québec airport	3,62	1,32	41%	45%	53%
Maximum	St-Hubert airport	3,80	1,39	39%	43%	50%

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,682E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,0244052	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	0,0069817	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	0,1488759	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,076E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,308E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

Cellules orangées: indique que le système décentralisé est préférable au scénario de référence

### AS - Par MJ produit avec variation du rendement des sys solaire (avril 2013)

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	525	539 (base)	550	575	600	625	650	675	700
Human health	DALY	1,22E-08	1,19E-08	1,16E-08	1,11E-08	1,07E-08	1,03E-08	9,92E-09	9,57E-09	9,24E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,00668	0,006544	0,006443	0,006226	0,006027	0,005844	0,005675747	0,005519505	0,00537442
Climate change	kg CO2 eq	0,00857	8,36E-03	0,008198	0,007859	0,007548	0,007262	0,006997365	0,006752706	0,00652552
Resources	MJ primary	0,142508	0,139027	0,136417	0,130855	0,125757	0,121067	0,11673767	0,11272901	0,10900668
Aquatic acidification	kg SO2 eq	5,60E-05	5,46E-05	5,36E-05	5,14E-05	4,93E-05	4,74E-05	4,57E-05	4,41E-05	4,2599E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	9,56E-07	9,31E-07	9,13E-07	8,73E-07	8,37E-07	8,04E-07	7,73E-07	7,45E-07	7,1872E-07

Avec écart significatif		
point de bascule (COP)	-	+
>700	550<x<575	>700
<525		
>700	575<x<600	>700
<525	<525	550<x<575
>700	550<x<575	>700
>700	>700	>700

Équivalent au syst. de ref. pour rendement [550 - > 700]

Équivalent au syst. de ref. pour rendement [575 - > 700]  
Solaire mieux que réf. si rendement > 550. Équivalent au syst. de ref.  
Équivalent au syst. de ref. pour rendement [550 - > 700]  
Réf. toujours mieux.

### AS - Scénario chauffage résidence moyenne avec variation du rendement des sys solaire (avril 2013)

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (of project autoproduction)
Method:	IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	525	539 (base)	550	575	600	625	650	675	700
Human health	DALY	9,00E-09	8,97E-09	8,95E-09	8,90E-09	8,84E-09	8,79E-09	8,74E-09	8,68E-09	8,63E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,022166	0,022089	0,022028	0,021891	0,021753	0,021616	0,021478248	0,021340765	0,02120328
Climate change	kg CO2 eq	0,007108	0,007084	0,007066	0,007023	0,006981	0,006939	0,006896381	0,006854095	0,00681181
Resources	MJ primary	0,146894	0,146398	0,146009	0,145123	0,144238	0,143352	0,14246646	0,14158087	0,14069529
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,23E-05	4,21E-05	4,20E-05	4,18E-05	4,15E-05	4,13E-05	4,10E-05	4,08E-05	4,05E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	2,31E-07	2,31E-07	2,30E-07	2,30E-07	2,29E-07	2,28E-07	2,27E-07	2,26E-07	2,26E-07

Avec écart significatif		
point de bascule (COP)	-	+
675	<525	>700
<525		
<525	<525	>700
<525	<525	>700
675	<525	<700
>700	>700	>700

Solaire équivalent à ref sur toute la plage étant donné les incertitudes  
Solaire équivalent à ref sur toute la plage étant donné les incertitudes  
Solaire équivalent à ref sur toute la plage étant donné les incertitudes  
Solaire équivalent à ref sur toute la plage étant donné les incertitudes  
Réf. toujours mieux.

## Analyse de sensibilité - surface installée de collecteurs plats

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

### AS - Par MJ produit avec variation de la surface installée du sys solaire coll. Plats (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	4	5	6 (base)	7	8	9	10
Human health	DALY	1,47E-08	1,30E-08	1,19E-08	1,11E-08	1,05E-08	9,99E-09	9,62E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,007613	0,006972	0,006544	0,006239	0,00601	0,005832	0,005689527
Climate change	kg CO2 eq	0,010433	0,009188	0,008358	0,007765	0,00732	0,006974	0,006697281
Resources	MJ primary	0,173173	0,152685	0,139027	0,129271	0,121954	0,116263	0,11171052
Aquatic acidification	kg SO2 eq	6,50E-05	5,88E-05	5,46E-05	5,17E-05	4,94E-05	4,77E-05	4,63E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	9,89E-07	9,54E-07	9,31E-07	9,15E-07	9,03E-07	8,93E-07	8,86E-07

	Avec écart significatif	
point de bascule (COP	-	+
>10	6<x<7	>10
<4		
9	7<x<8	>10
5<x<6	4<x<5	6<x<7
>10	6<x<7	>10
>10	>10	>10

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [7 - > 10]

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [8 - > 10]

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [5 - 7]. Solaire m

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [7 - > 10]

Ref. toujours mieux

### AS - Scénarios chauffage résidence moyenne avec variation de la surface installée du sys solaire coll. Plats (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	4	5	6 (base)	7	8	9	10
Human health	DALY	9,12E-09	9,04E-09	8,97E-09	8,9E-09	8,83E-09	8,76E-09	8,69309E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,022952	0,02252	0,022089	0,021657	0,021226	0,020794	0,020362883
Climate change	kg CO2 eq	0,007226	0,007155	0,007084	0,007013	0,006942	0,006871	0,006800034
Resources	MJ primary	0,150123	0,148261	0,146398	0,144536	0,142674	0,140812	0,13894991
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,25E-05	4,23E-05	4,21E-05	4,19E-05	4,17E-05	4,15E-05	4,12693E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	2,02E-07	2,17E-07	2,31E-07	2,45E-07	2,59E-07	2,74E-07	2,87807E-07

	Avec écart significatif	
point de bascule (COP	-	+
>10	<4	>10
<4		
7<x<8	<4	>10
4<x<5	<4	>10
>10	<4	>10
<4	<4	<4

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Ref. toujours mieux

## Analyse de sensibilité - surface installée de collecteurs à tubes sous vide

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

### AS - Par MJ produit avec variation de la surface installée du sys solaire à tubes sous vide (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	10	12	14	16	18	20
Human health	DALY	1,28E-08	1,15E-08	1,05E-08	9,83E-09	9,29E-09	8,85E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,00641	0,005932	0,005591	0,005335	0,005135	0,004976
Climate change	kg CO2 eq	0,009753	0,008628	0,007825	0,007223	0,006754	0,006379
Resources	MJ primary	0,161047	0,14293	0,129989	0,120284	0,112735	0,106696
Aquatic acidification	kg SO2 eq	6,03E-05	5,47E-05	5,08E-05	4,78E-05	4,55E-05	4,36E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	7,68E-07	7,36E-07	7,13E-07	6,96E-07	6,83E-07	6,72E-07

	Avec écart significatif		
point de bascule (COP)	-	+	
>20	12<x<14	>20	
<10			
16<x<18	14<x<16	>20	
10<x<12	<10	12<x<14	
>20	12<x<14	>20	
>20	>20	>20	

Équivalent au syst. de ref. pour surface [14 - >20]

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [16 - > 20]

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [<10 - 14]. Solaire mieux si >14 m²

Équivalent au syst. de ref. pour surface [14 - >20]

Ref toujours mieux

### AS - Scénarios chauffage résidence moyenne avec variation de la surface installée du sys solaire coll. à tubes sous vide (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2B. Solaire thermique (combiné) à tubes sous-vide + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	10	12	14	16	18	20
Human health	DALY	9,23E-09	9,08E-09	8,92E-09	8,76E-09	8,61E-09	8,45E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,020815	0,019996	0,019178	0,018359	0,017541	0,016723
Climate change	kg CO2 eq	0,007263	0,0071	0,006938	0,006775	0,006612	0,00645
Resources	MJ primary	0,14722	0,143328	0,139436	0,135544	0,131652	0,12776
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,32E-05	4,26E-05	4,21E-05	4,15E-05	4,09E-05	4,03E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	2,46E-07	2,64E-07	2,81E-07	2,98E-07	3,15E-07	3,32E-07

	Avec écart significatif		
point de bascule (COP)	-	+	
16<x<18	<10	>20	
<10			
12<x<14	<10	>20	
<10	<10	16<x<18	
18<x<20	<10	>20	
<10	<10	<10	

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour surfaces [<10 - 18]. Solaire mieux si >18 m²

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Ref toujours mieux

## Analyse de sensibilité - Durée de vie des collecteurs plats

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

### AS -Par MJ produit avec variation de la durée de vie du sys solaire coll. Plats (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	Cas de base					Avec écart significatif		
		25	30	35	40	45	point de bascule (COP)	-	+
Human health	DALY	1,19E-08	1,09E-08	1,02E-08	9,66E-09	9,26E-09	>45	25<x<30	>45
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,006544	0,006043	0,005686	0,005417	0,005208	<25		
Climate change	kg CO2 eq	0,008358	0,007699	0,007228	0,006875	0,006601	35<x<40	30	>45
Resources	MJ primary	0,139027	0,128262	0,120573	0,114806	0,11032	<25	<25	<25
Aquatic acidification	kg SO2 eq	5,46E-05	4,93E-05	4,55E-05	4,26E-05	4,04E-05	40<x<45	25<x<30	>45
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	9,31E-07	7,95E-07	6,98E-07	6,25E-07	5,69E-07	>45	>45	>45

Équivalent au syst. de ref. pour durée de vie [30- >45]

Équivalent au syst. de ref. pour durée de vie [30 - >45]  
solaire toujours préférable sur plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour durée de vie [30 - >45]  
Ref toujours mieux

### AS - Scénarios chauffage résidence moyenne avec variation de la durée de vie du sys solaire coll. Plats (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2A. Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	25	30	35	40	45	Avec écart significatif		
							point de bascule (COP)	-	+
Human health	DALY	8,97E-09	8,85E-09	8,76E-09	8,69E-09	8,64E-09	40<x<45	<25	>45
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,022089	0,022025	0,021979	0,021945	0,021919	<25		
Climate change	kg CO2 eq	0,007084	0,007	0,00694	0,006895	0,006861	30<x<35	<25	>45
Resources	MJ primary	0,146398	0,145028	0,14405	0,143316	0,142745	<25	<25	>45
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,21E-05	4,14E-05	4,10E-05	4,06E-05	4,03E-05	35<x<40	<25	>45
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	2,31E-07	2,14E-07	2,01E-07	1,92E-07	1,85E-07	>45	>45	>45

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Ref toujours mieux

## Analyse de sensibilité - Durée de vie des collecteurs à air vitrés

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

### AS -Par MJ produit avec variation de la durée de vie du sys solaire coll. à air vitrés (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	20	25	30	37,5	40
Human health	DALY	4,86E-09	3,99E-09	3,41E-09	2,83E-09	2,68E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,004936	0,004026	0,003419	0,002811	0,00266
Climate change	kg CO2 eq	0,004987	0,004054	0,003432	0,002809	0,002654
Resources	MJ primary	0,081962	0,066624	0,056399	0,046173	0,043617
Aquatic acidification	kg SO2 eq	<b>3,07E-05</b>	<b>2,58E-05</b>	<b>2,26E-05</b>	<b>1,93E-05</b>	<b>1,85E-05</b>
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	<b>1,68E-07</b>	<b>1,36E-07</b>	<b>1,15E-07</b>	<b>9,32E-08</b>	<b>8,79E-08</b>

point de bascule (COP)	Avec écart significatif	
	-	+
<20	<20	<20
<20		
<20	<20	<20
<20	<20	<20
<20	<20	30<x<37,5
25<x<30	<20	37,5<x<40

Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée

Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée

Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée

Équivalent au syst. de ref. pour durée de vie [<20 - 30] / Solaire mieux si > 30 ans

Solaire mieux si> 37,5 ans

### AS - Scénarios chauffage résidence moyenne avec variation de la durée de vie du sys solaire coll. à air (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure processe No  
 Exclude long-term emissions: No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	20	25	30	37,5	40
Human health	DALY	8,27E-09	8,16E-09	8,09E-09	8,03E-09	8,01E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,022123	0,022015	0,021944	0,021872	0,021854
Climate change	kg CO2 eq	0,006769	0,006659	0,006586	0,006512	0,006494
Resources	MJ primary	0,141368	0,139559	0,138353	0,137147	0,136846
<b>Aquatic acidification</b>	<b>kg SO2 eq</b>	<b>3,97E-05</b>	<b>3,91E-05</b>	<b>3,87E-05</b>	<b>3,84E-05</b>	<b>3,83E-05</b>
<b>Aquatic eutrophication</b>	<b>kg PO4 P-lim</b>	<b>1,36E-07</b>	<b>1,32E-07</b>	<b>1,29E-07</b>	<b>1,27E-07</b>	<b>1,26E-07</b>

point de bascule (COP)	Avec écart significatif	
	-	+
<20	<20	>40
<20		
<20	<20	>40
<20	<20	>40
<20	<20	>40
<20	<20	>40
25<x<30	<20	>40

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

Équivalent au syst. de ref. pour toute la plage évaluée

## Analyse de sensibilité - Nombre de capteurs solaires à air

Rappel - système de référence:

		/MJ	écart	Ref + écart	Ref - écart
Human health	DALY	8,68E-09	30%	1,13E-08	6,08E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	2,44E-02	100%	2,44E+00	2,44E-04
Climate change	kg CO2 eq	6,98E-03	10%	7,68E-03	6,28E-03
Resources	MJ primary	1,49E-01	10%	1,64E-01	1,34E-01
Aquatic acidification	kg SO2 eq	4,08E-05	30%	5,30E-05	2,85E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,31E-07	30%	1,70E-07	9,16E-08

### AS - Par MJ produit avec variation du nombre de capteurs solaires à air (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air (analyse de contribution) (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure prc No  
 Exclude long-term emissi No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

Damage category	Unit	base					Avec écart significatif		
		2	3	4	5	6	point de bascule (COP	-	+
Human health	DALY	2,83E-09	2,62E-09	2,52E-09	2,46E-09	2,42E-09	<2	<2	<2
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,002811	0,002665	0,002592	0,002548	0,002519	<2		
Climate change	kg CO2 eq	0,002809	0,00268	0,002615	0,002576	0,00255	<2	<2	<2
Resources	MJ primary	0,046173	0,044051	0,042989	0,042353	0,041928	<2	<2	<2
<b>Aquatic acidification</b>	<b>kg SO2 eq</b>	<b>1,93E-05</b>	<b>1,70E-05</b>	<b>1,59E-05</b>	<b>1,52E-05</b>	<b>1,47E-05</b>	<2	<2	<2
<b>Aquatic eutrophication</b>	<b>kg PO4 P-li</b>	<b>9,32E-08</b>	<b>8,89E-08</b>	<b>8,68E-08</b>	<b>8,55E-08</b>	<b>8,46E-08</b>	<2	<2	2<x<3

Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée

Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée  
 Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée  
 Système solaire toujours préférable au syst. de réf. sur la plage testée  
 système solaire équivalent si 2 panneaux. préférable si < 2 panneaux

### AS - Scénario chauffage d'une résidence moyenne avec variation du nombre de capteurs solaires à air (avril 2013)

Calculation: Compare  
 Results: Impact assessment  
 Product 1: 1 MJ 2C. Solaire thermique chauffe-air + électricité (of project autoproduction)  
 Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+  
 Indicator: Damage assessment  
 Unit: %  
 Skip categories: Never  
 Exclude infrastructure prc No  
 Exclude long-term emissi No  
 Per impact category: No  
 Sorted on item: Damage category  
 Sort order: Ascending

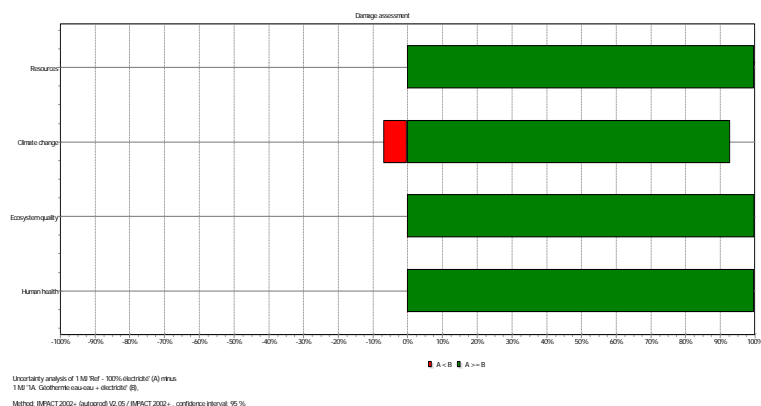
Damage category	Unit	2	5	8	12	16
Human health	DALY	8,03E-09	7,30E-09	6,57E-09	5,11E-09	4,39E-09
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,021872	0,019287	0,016703	0,011533	0,008948
Climate change	kg CO2 eq	0,006512	0,005997	0,005482	0,004451	0,003936
Resources	MJ primary	0,137147	0,124664	0,11218	0,087213	0,07473
Aquatic acidification	kg SO2 eq	3,84E-05	3,51E-05	3,19E-05	2,55E-05	2,23E-05
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-li	1,27E-07	1,22E-07	1,16E-07	1,05E-07	1,00E-07

## Analyse Monte Carlo - Comparaison du scénario 1A et référence 100% Électricité

A: Référence 100% électricité  
B: Scénario 1A Géothermie liquide-eau + Électricité

Légende: Aucune inversion possible  
Inversion possible, mais faible probabilité (< ou =15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents  
Inversion possible, probabilité élevée (> 15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

Number of runs performed 1000  
Total calculation time 17:36:13,360:339  
Part of values that contain uncertainty data 70,20%  
Distribution Count  
Total 124817  
Undefined 37163 (29,8%)  
Lognormal 87626 (70,2%)  
Normal 12 (0,00961%)  
Triangle 8 (0,00641%)  
Uniform 8 (0,00641%)



Impact category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Aquatic acidification	99,20%	1,48E-05	1,42E-05	7,65E-06	51,60%	1,85E-06	3,21E-05	0,0186
Aquatic ecotoxicity	100%	3,85	3,63	1,46	37,80%	1,75	7,24	0,0136
Aquatic eutrophication	26,40%	-1,69E-08	-1,81E-08	3,05E-08	-181%	-7,13E-08	4,31E-08	-0,0651
Carcinogens	98,20%	4,98E-05	4,54E-05	3,14E-05	63,10%	1,84E-06	0,000123	0,0227
Global warming	93%	0,00161	0,00146	0,00121	75,20%	-0,000373	0,0044	0,0271
Ionizing radiation	100%	0,539	0,321	0,737	137%	0,0832	2,39	0,0492
Land occupation	100%	5,14E-05	4,81E-05	1,93E-05	37,50%	2,35E-05	9,48E-05	0,0135
Mineral extraction	100%	0,000469	0,000457	0,000125	26,60%	0,000258	0,000736	0,00956
Non-carcinogens	100%	0,000373	0,000312	0,000234	62,90%	0,000122	0,000925	0,0226
Non-renewable energy	99,90%	0,0687	0,061	0,0395	57,50%	0,0146	0,166	0,0207
Ozone layer depletion	0%	-4,63E-08	-4,35E-08	1,65E-08	-35,70%	-8,45E-08	-2,18E-08	-0,0128
Respiratory inorganics	99,50%	3,34E-06	3,20E-06	1,67E-06	49,80%	3,99E-07	6,90E-06	0,0179
Respiratory organics	36,70%	-7,59E-08	-1,31E-07	4,81E-07	-634%	-8,13E-07	1,04E-06	-0,228
Terrestrial acid/nutri	80,10%	2,00E-05	1,95E-05	2,52E-05	126%	-2,69E-05	7,47E-05	0,0454
Terrestrial ecotoxicity	100%	2,08	1,97	0,723	34,80%	1,03	3,8	0,0125

Confidence interval: 95

Damage category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Climate change	93%	0,00161	0,00146	0,00121	75,20%	-0,000373	0,0044	0,0271
Ecosystem quality	100%	0,0167	0,0159	0,00581	34,80%	0,0083	0,0306	0,0125
Human health	99,90%	3,59E-09	3,38E-09	1,66E-09	46,30%	9,61E-10	7,02E-09	0,0167
Resources	99,90%	0,0691	0,0614	0,0395	57,20%	0,0149	0,167	0,0206

Confidence interval: 95

## Analyse Monte Carlo - Comparaison du scénario 1B et référence 100% Électricité

A: Référence 100% électricité

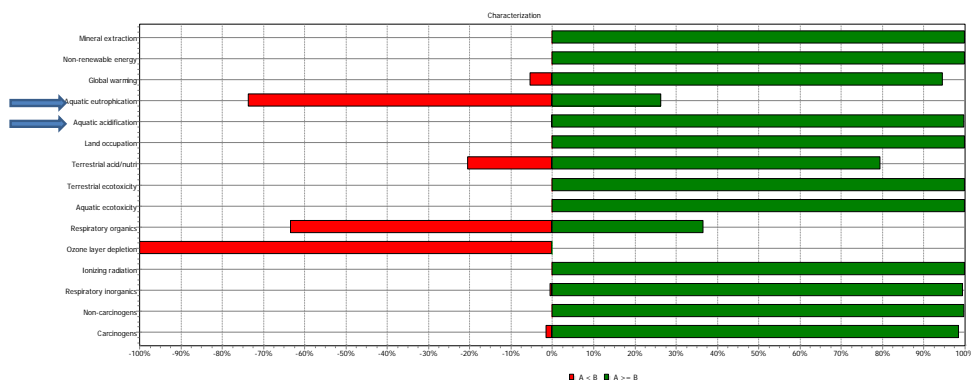
B: Scénario 1B Géothermie liquide-air + Électricité

Légende: Aucune inversion possible

Inversion possible, mais faible probabilité (< ou =15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

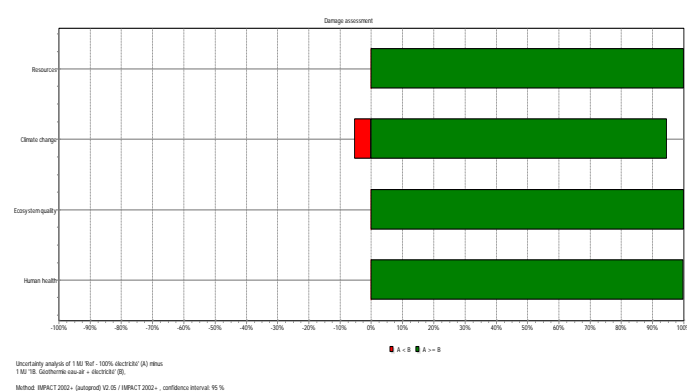
Inversion possible, probabilité élevée (> 15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

Number of runs performed 1000  
Total calculation time 18:10:55.751:629  
Part of values that contain uncertainty data 70,30%  
Distribution Count  
Total 125291  
Undefined 37179 (29.7%)  
Lognormal 88084 (70.3%)  
Normal 12 (0.00958%)  
Triangle 8 (0.00639%)  
Uniform 8 (0.00639%)



Uncertainty analysis of 1 MJ Ref - 100% electricity (A) minus  
1 MJ 1B. Géothermie eau-air + électricité (B).

Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %



Uncertainty analysis of 1 MJ Ref - 100% electricity (A) minus  
1 MJ 1B. Géothermie eau-air + électricité (B).

Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %

Impact category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Aquatic acidification	99,80%	1,50E-05	1,41E-05	7,72E-06	51,40%	3,27E-06	3,41E-05	0,0163
Aquatic ecotoxicity	100%	3,82	3,58	1,42	37,20%	1,78	7,57	0,0118
Aquatic eutrophication	26,40%	-1,55E-08	-1,84E-08	3,01E-08	-195%	-6,98E-08	5,33E-08	-0,0615
Carcinogens	98,50%	5,06E-05	4,52E-05	3,48E-05	68,80%	3,60E-06	0,000127	0,0218
Global warming	94,60%	0,00168	0,00144	0,0013	77,40%	-0,000232	0,00482	0,0245
Ionizing radiation	100%	0,565	0,333	0,75	133%	0,0821	2,71	0,042
Land occupation	100%	5,28E-05	4,93E-05	2,22E-05	42,00%	2,36E-05	1,07E-04	0,0133
Mineral extraction	100%	0,000472	0,000456	0,000123	26,00%	0,000274	0,000749	0,00822
Non-carcinogens	100%	0,000379	0,000321	0,000273	72,00%	1,14E-04	0,00101	0,0228
Non-renewable energy	100%	0,0699	0,0599	0,0481	68,80%	0,0162	0,178	0,0218
Ozone layer depletion	0%	-4,69E-08	-4,32E-08	1,79E-08	-38,10%	-8,89E-08	-2,14E-08	-0,012
Respiratory inorganics	99,50%	3,37E-06	3,21E-06	1,65E-06	48,90%	8,28E-07	7,18E-06	0,0155
Respiratory organics	36,60%	-8,42E-08	-1,48E-07	4,78E-07	-568%	-7,96E-07	9,48E-07	-0,18
Terrestrial acid/nutri	79,50%	2,02E-05	1,77E-05	2,56E-05	126%	-2,32E-05	8,02E-05	0,04
Terrestrial ecotoxicity	100%	2,07	1,95	0,716	34,60%	1,03	3,79	0,0109

Confidence interval: 95

Damage category A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean	
Climate chang	94,60%	0,00168	0,00144	0,0013	77,40%	-0,000232	0,00482	0,0245
Ecosystem qu	100%	0,0167	0,0157	0,00576	34,60%	0,00827	0,0304	0,0109
Human health	99,90%	3,63E-09	3,42E-09	1,72E-09	47,30%	1,16E-09	7,52E-09	0,015
Resources	100%	0,0703	0,0604	0,0481	68,40%	0,0166	0,179	0,0216

Confidence in 95

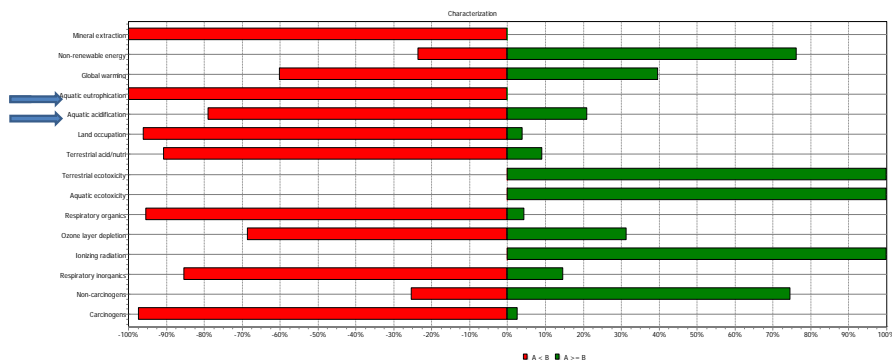


## Analyse Monte Carlo - Comparaison du scénario 2A et référence 100% électricité

A: Référence 100% électricité  
B: Scenario 2A Système solaire thermique à collecteurs plats (eau chaude) + Électricité

Légende:   
Aucune inversion possible  
Inversion possible, mais faible probabilité (< ou ~15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents  
Inversion possible, probabilité élevée (> 15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

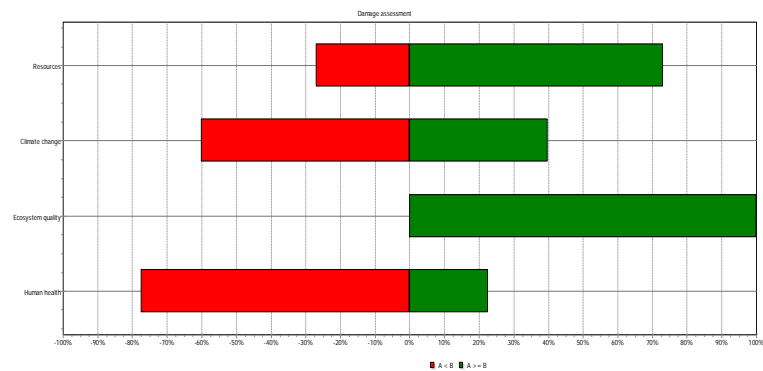
Number of runs performed 1000  
Total calculation time 11:15:43.082:901  
Part of values that contain uncertainty data 69,30%  
Distribution Count  
Total 61112  
Undefined 18787 (30.7%)  
Lognormal 42297 (69.2%)  
Normal 7 (0.0115%)  
Triangle 13 (0.0213%)  
Uniform 8 (0.0131%)



Uncertainty analysis of 1 Mt Ref - 100% electricity (A) minus  
1 Mt 2A: Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (B).  
Method: IMPACT 2002+ (autoprof) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %

Impact category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Aquatic acidification	21,00%	-9,74E-07	-1,25E-06	1,54E-06	-159,00%	-3,33E-06	2,88E-06	-0,0502
Aquatic ecotoxicity	100%	0,694	0,634	0,322	46%	0,269	1,52	0,0147
Aquatic eutrophication	0%	-1,09E-07	-1,06E-07	2,51E-08	-23,00%	-1,68E-07	-6,91E-08	-0,00727
Carcinogens	2,60%	-1,58E-05	-1,63E-05	6,37E-06	-40,30%	-2,55E-05	3,90E-07	-0,0127
Global warming	39,80%	-2,03E-05	-5,72E-05	0,00025	-1230%	-0,000389	0,000591	-0,389
Ionizing radiation	100%	0,0829	0,0511	0,103	124%	0,0112	0,337	0,0393
Land occupation	4%	-6,81E-06	-7,01E-06	3,50E-06	-51,40%	-1,33E-05	1,53E-06	-0,0163
Mineral extraction	0%	-0,000424	-0,000423	5,06E-05	-11,90%	-0,000528	-0,000333	-0,00378
Non-carcinogens	74,60%	2,15E-05	1,31E-05	3,92E-05	182%	-2,47E-05	1,15E-04	0,0575
Non-renewable energy	76,30%	0,00469	0,00367	0,00676	144%	-0,0056	0,021	0,0456
Ozone layer depletion	31,40%	-1,15E-11	-1,51E-11	3,48E-11	-302%	-6,95E-11	6,86E-11	-0,0955
Respiratory inorganics	14,70%	-3,30E-07	-3,80E-07	3,34E-07	-101%	-8,50E-07	4,45E-07	-0,032
Respiratory organics	4,50%	-1,70E-07	-1,81E-07	9,24E-08	-54,20%	-3,20E-07	4,83E-08	-0,0172
Terrestrial acid/nutri	9,20%	-6,63E-06	-7,26E-06	4,74E-06	-71,50%	-1,42E-05	4,43E-06	-0,0226
Terrestrial ecotoxicity	100%	0,343	0,312	0,165	48,30%	0,121	0,755	0,0153

Confidence interval: 95



Uncertainty analysis of 1 Mt Ref - 100% electricity (A) minus  
1 Mt 2A: Solaire thermique (eau chaude) à collecteurs plats + électricité (B).  
Method: IMPACT 2002+ (autoprof) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %

Damage category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
60,20% Climate change	39,80%	-2,03E-05	-5,72E-05	0,00025	-1230%	-0,000389	0,000591	-0,389
0,00% Ecosystem quality	100%	0,00273	0,00249	0,00133	48,70%	0,000947	0,00604	0,0154
77,50% Human health	22,50%	-1,98E-10	-2,51E-10	3,34E-10	-169,00%	-6,86E-10	6,04E-10	-0,0534
27,00% Resources	73,00%	0,00427	0,00321	0,00677	159%	-0,00597	0,0206	0,0502

Confidence interval: 95

## Analyse Monte Carlo - Comparaison du scénario 2B et référence 100% Électricité

A: Référence 100% électricité

B: Scénario 2B Système solaire thermique à tubes sous vide + Électricité

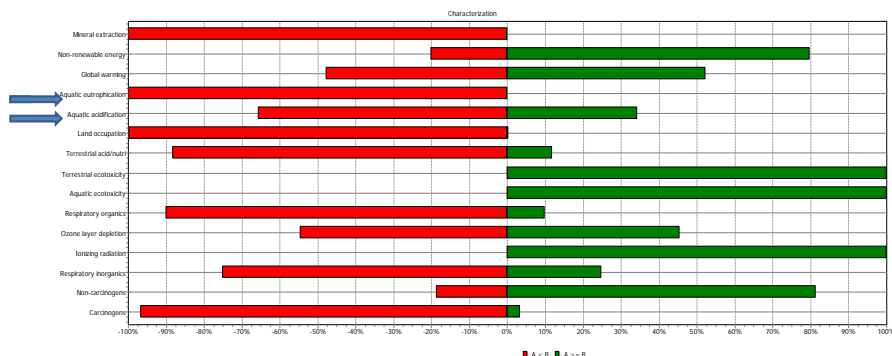
Légende:

Aucune inversion possible

Inversion possible, mais faible probabilité (< ou ~15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

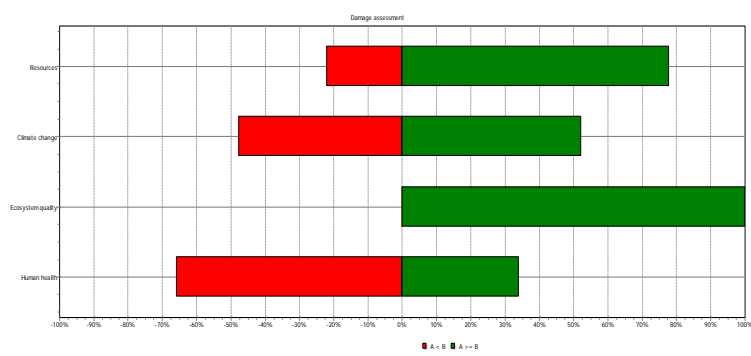
Inversion possible, probabilité élevée (> 15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

Number of runs performed 1000  
Total calculation time 11:19:31.076:863  
Part of values that contain uncertainty data 69,20%  
Distribution Count  
Total 61085  
Undefined 18817 (30.8%)  
Lognormal 42240 (69.1%)  
Normal 7 (0.0115%)  
Triangle 13 (0.0213%)  
Uniform 8 (0.0131%)



Uncertainty analysis of 1 MU Ref - 100% electricity (A) minus  
1 MU 2B: Solaire thermique (combinaison à tubes sous-vide + électricité) (B).  
Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %

Impact category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
65,80% Aquatic acidification	34,20%	-9,13E-07	-1,35E-06	2,87E-06	-314%	-5,28E-06	5,99E-06	-0,0994
Aquatic ecotoxicity	100%	1,34	1,25	0,571	42,50%	0,532	2,75	0,0134
Aquatic eutrophication	0%	-1,45E-07	-1,42E-07	3,17E-08	-21,80%	-2,13E-07	-9,24E-08	-0,00691
Carcinogens	3,30%	-2,41E-05	-2,53E-05	1,21E-05	-50,40%	-4,46E-05	1,75E-06	-0,0159
Global warming	52,20%	0,000106	1,75E-05	0,000513	485%	-0,000642	0,00133	0,153
Ionizing radiation	100%	0,192	0,111	0,266	138%	0,0246	0,862	0,0438



Uncertainty analysis of 1 MU Ref - 100% electricity (A) minus  
1 MU 2B: Solaire thermique (combinaison à tubes sous-vide + électricité) (B).  
Method: IMPACT 2002+ (autoprod) V2.05 / IMPACT 2002+ - confidence interval: 95 %

Damage category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient)	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
47,80% Climate change	52,20%	0,000106	1,75E-05	0,000513	485%	-0,000642	0,00133	0,153
0,00% Ecosystem quality	100%	0,00526	0,0048	0,00237	45,00%	0,00187	0,0115	0,0142
65,90% Human health	34%	-1,61E-10	-2,59E-10	6,34E-10	-394%	-1,12E-09	1,33E-09	-0,125
22,10% Resources	77,90%	0,011	0,00823	0,0147	134%	-0,00945	0,0442	0,0422

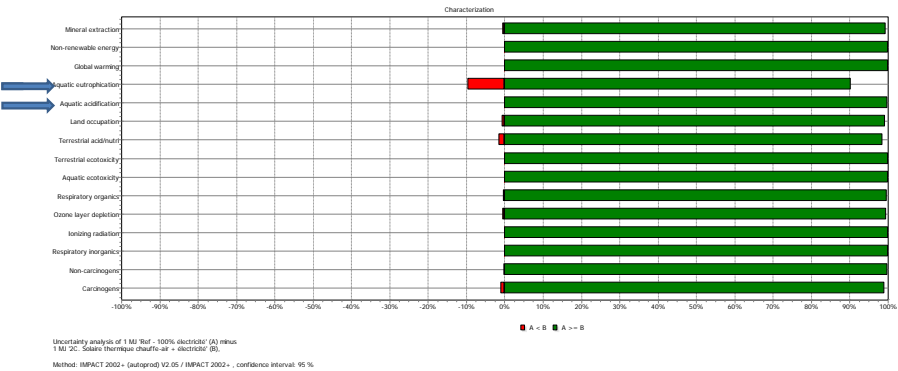
Confidence interval: 95

Analyse Monte Carlo - Comparaison du scénario 2C et référence 100% Électricité

A: Référence 100% électricité  
B: Scenario 2C Système solaire thermique chauffe-aire + Électricité

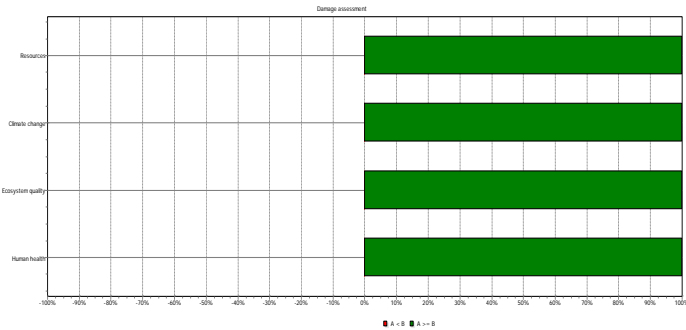
Légende: Aucune inversion possible  
Inversion possible, mais faible probabilité (< ou ~15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents  
Inversion possible, probabilité élevée (> 15%) - par rapport aux résultats déterministes des ongles précédents

Number of runs performed 1000  
Total calculation time 18:49:21.180:384  
Part of values that contain uncertainty data 70,50%  
Distribution Count  
Total 125572  
Undefined 37080 (29.5%)  
Lognormal 88459 (70.4%)  
Normal 12 (0.00956%)  
Triangle 13 (0.0104%)  
Uniform 8 (0.00637%)



Impact category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Aquatic acidification	99,90%	5,54E-06	4,96E-06	3,20E-06	58%	1,28E-06	1,34E-05	0,0182
Aquatic ecotoxicity	100%	1,17	1,03	0,626	53,50%	0,383	2,72	0,0169
Aquatic eutrophication	90%	9,22E-09	6,79E-09	9,54E-09	103,00%	-2,49E-09	3,20E-08	0,0327
Carcinogens	99,00%	1,66E-05	1,40E-05	1,18E-05	71,00%	1,96E-06	4,77E-05	0,0225
Global warming	100,00%	0,000963	8,78E-04	0,000501	52%	0,00029	0,00229	0,0165
Ionizing radiation	100%	0,154	0,0917	0,201	130%	0,0202	0,675	0,0413
Land occupation	99,20%	9,40E-06	7,64E-06	7,09E-06	75,50%	7,47E-07	2,83E-05	0,0239
Mineral extraction	99%	7,07E-05	6,01E-05	4,48E-05	63,30%	1,14E-05	1,81E-04	0,02
Non-carcinogens	99,80%	1,17E-04	9,57E-05	8,64E-05	74%	2,62E-05	0,000371	0,0233
Non-renewable energy	100,00%	0,0237	0,0201	0,0157	66%	0,00611	0,0603	0,0209
Ozone layer depletion	99,50%	8,13E-11	6,59E-11	5,98E-11	74%	7,74E-12	2,54E-10	0,0232
Respiratory inorganics	100,00%	1,35E-06	1,20E-06	6,90E-07	51,20%	4,25E-07	2,99E-06	0,0162
Respiratory organics	99,60%	2,17E-07	1,80E-07	1,58E-07	72,60%	3,09E-08	6,67E-07	0,023
Terrestrial acid/nutri	98,50%	1,40E-05	1,19E-05	9,73E-06	69,60%	8,17E-07	3,87E-05	0,022
Terrestrial ecotoxicity	100%	0,632	0,565	0,321	50,90%	0,213	1,45	0,0161

Confidence interval: 95



Damage category	A >= B	Mean	Median	SD	CV (Coefficient	2,50%	97,50%	Std.err.of mean
Climate change	100,00%	0,000963	8,78E-04	0,000501	52%	0,00029	0,00229	0,0165
Ecosystem quality	100%	0,00508	0,00454	0,00259	50,90%	0,00172	0,0117	0,0161
Human health	100%	1,35E-09	1,20E-09	6,97E-10	52%	4,26E-10	3,02E-09	0,0163
Resources	100,00%	0,0238	0,0202	0,0157	66%	0,00612	0,0606	0,0209

Confidence interval: 95

## **Annexe F : Revue critique**

---

Cette annexe inclut :

- Le premier rapport de revue critique
- Le document de réponse au réviseur
- Le rapport de revue final

Le 23 mars 2013

Monsieur Christian Turpin  
Conseiller - Performance environnementale- Chirnie Environnement et développement durable  
Hydro-Québec  
75, boulevard René-Lévesque Ouest  
Montréal (Québec) H2Z 1A4

**Objet:** Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle  
O/Ref.: 068-B0004302-002-EN-R-0002-00

Cher monsieur Turpin,

Le comité de revue critique que je préside a complété la revue de l'étude ACV que vous avez demandé au CIRALG de produire pour le compte d'Hydro-Québec. La revue critique d'une étude ACV est un exercice ayant pour objectif d'assurer que l'étude et son rapport répondent aux exigences de la norme ISO 14004. Notre travail ne consiste pas à approuver ou non la divulgation de l'étude à un public externe. Cette décision revient aux mandataires de l'étude.

Vous trouverez dans le document joint à cette lettre des commentaires généraux de même que des commentaires plus spécifiques. Les commentaires sont codifiés selon que des corrections sont requises, recommandées ou suggérées et que ces corrections ont une incidence directe, indirecte ou aucune incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14004.

Bien que dans l'ensemble l'étude respecte les grandes lignes de la norme ISO 14004, le comité de revue critique a relevé plusieurs hypothèses ou paramètres de l'étude pour lesquels des justifications ou des références sont manquantes. Ceci concerne principalement la durée de vie de différents systèmes comparés. Selon l'expertise des membres du comité de revue critique, ces durées de vie sont dans la majorité des cas trop optimiste. Étant donné que les impacts associés à la production et à l'installation des systèmes, de même que les impacts en fin de vie, sont amortis sur l'ensemble de la durée de vie des systèmes, ce paramètre est considéré comme central dans l'étude. Ainsi une surestimation de la durée de vie des systèmes aurait pour effet de minimiser les impacts des phases de production, d'installation et de fin de vie. Le travail du comité de revue critique n'est pas de statuer sur la durée de vie des systèmes, ni de donner un avis sur toute valeur à utiliser dans l'étude, mais de déterminer si les valeurs utilisées sont représentatives du contexte de l'étude. Le comité invite donc les auteurs de l'étude à revoir les informations présentées dans l'étude et permettant de justifier les durées de vie présentées pour chaque système, ou de revoir ces valeurs.

Également, le comité souhaite attirer l'attention des auteurs de l'étude sur l'uniformisation de l'interprétation des résultats. En raison de l'incertitude associée aux modèles d'évaluation des impacts, les auteurs n'ont pas pu distinguer entre deux systèmes celui présentant les bénéfices environnementaux

DESSAU.COM

T 514.281.010  
F 514.738.979  
monrevu@dessau.com  
1080 Côte du Beaver Hill  
Bureau 300, Montréal (Québec)  
Canada H2Z 1S9

Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle  
O/Ref.: 068-B-0004302-001-EN-R-0002-00  
23 mars 2013

potentails les plus grands. Par contre, à d'autres endroits dans l'étude, une telle distinction est faite pour les mêmes systèmes et les mêmes catégories d'impacts.

Finalement, considérant qu'un des objectifs de l'étude est d'identifier les paramètres clés des systèmes de production décentralisée d'énergie thermique et ce, dans l'idée notamment de cerner des pistes d'amélioration pour l'option de mesurage net pour autoproductions, le comité juge que les principaux contributeurs (processus) des différents impacts ne sont pas suffisamment détaillés.

Compte tenu de ces points et des autres présentés dans le document ci-joint, le comité de revue critique juge que l'étude dans sa première version ne répond pas aux exigences de la norme ISO 14004. Néanmoins, le comité est confiant qu'il est possible de répondre de manière satisfaisante à ces commentaires, ce qui rendrait l'étude conforme à cette norme.

C'est donc dans l'idée de relire une version modifiée de l'étude ACV que le comité vous invite à prendre en considération ces commentaires et à en discuter avec les auteurs de l'étude afin d'apporter les corrections et justifications requises. A titre de président du comité de revue critique, je reste à votre entière disposition pour discuter des commentaires contenus dans ce document.

J'espère le tout à votre satisfaction.



Gontan Bage, ing., Ph.D.  
Chargé de projet- Expert en analyse du cycle de vie

DESSAU.COM

RÉSUMÉ DE LA DÉCISION DU COMITÉ

TITRE DE L'ÉTUDE RÉVISÉE	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE FILIÈRES DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'ÉNERGIE THERMIQUE À PETITE ÉCHELLE
DATE DU RAPPORT	Septembre 2012
AUTEUR DE L'ÉTUDE	CIRAIG
COMMANDITAIRE	Hydro-Québec
DATE DE LA REVUE CRITIQUE	Février 2012
DÉCISION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE	<div><input type="checkbox"/> Étude est conforme aux exigences de la norme ISO 14044</div> <div><input type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections mineures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Étude requiert des <u>corrections majeures</u> conformément aux exigences de la norme ISO 14044</div>

COMPOSITION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE

PRÉSIDENT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE	GONTRAN BAGE, ING., PH.D. CONSEILLER EN DÉVELOPPEMENT DURABLE
RÉVISEURS	<div>Reda Djebbar, Ph.D., P. Eng. Ingénieur senior- Énergie solaire thermique CarmaÉnergie</div> <div>Philippe Pasquier, Ing., Ph.D. Professeur- Département des génies civil, géologique et des mines École Polytechnique de Montréal</div>






Conformément à la section 6.3 de la norme ISO 14044, une étude doit faire l'objet d'une revue critique par un comité des parties prenantes si les résultats de l'étude peuvent être utilisés en support à une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Dans ce contexte, le travail des réviseurs est de s'assurer que l'étude est transparente et cohérente, que les données utilisées sont appropriées et en relation avec les objectifs de l'étude, que l'interprétation des résultats est en accord avec ces objectifs, que l'interprétation des résultats reflète les limites de l'étude telles qu'identifiées par ses auteurs, et que les méthodes employées par les auteurs de l'étude sont scientifiquement valables, adéquates par rapport aux objectifs de l'étude et en accord avec la norme ISO 14044. Il est important de rappeler qu'une décision du comité quant au respect par l'étude des exigences de la norme ISO 14044 ne signifie pas que le comité endosse la divulgation des résultats. Une telle divulgation reste sous la décision et la responsabilité des propriétaires de l'étude.

1 CODIFICATION DES COMMENTAIRES

Afin de guider les auteurs de l'étude dans les corrections à apporter à l'étude selon les commentaires des réviseurs, ces commentaires ont été codifiés selon la légende suivante :

- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est obligatoire, cet aspect de l'étude a une incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et sur les résultats de l'étude ;
- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est recommandée, cet aspect peut avoir une incidence indirecte sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et pourrait influencer les résultats de l'étude ;
- une correction, une modification, une adaptation ou une justification est suggérée mais non obligatoire, cet aspect n'a pas ou peu d'incidence sur la conformité de l'étude à la norme ISO 14044 et ne devrait pas influencer les résultats de l'étude.

2 COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

- Le chauffe-eau solaire présenté dans cette étude pour le système thermosolaire à collecteurs plats n'est pas représentatif de la technologie vendue au Québec et au Canada. Les chauffe-eaux solaires résidentiels vendus au Canada possèdent deux réservoirs, un pour emmagasiner l'eau préchauffée et un second réservoir qui possède une résistance électrique de chauffage ou un brûleur au gaz. Les systèmes avec un seul réservoir sont plus communs en Europe où l'espace résidentiel est restreint. 
- Le système thermosolaire à collecteurs plats avec une surface de captage de 4 m<sup>2</sup> est petit. La majorité des systèmes ont des capteurs plus grands, avec des surfaces de près de 6 m<sup>2</sup>. 
- Le système thermosolaire à tubes sous vide avec une surface de captage 10,5 m<sup>2</sup> et un réservoir d'eau de 1 200 litres est petit. Ceci expliquerait la faible contribution de ce type de système en termes de performance environnementale. 
- La durée de vie de 37,5 ans pour le système thermosolaire à capteurs à air vifés est trop grande. 
- La durée de vie de 50 ans pour le système géothermique est trop grande. Le système sous-terrain pourrait avoir une telle durée de vie, mais les équipements hors-terre n'ont pas une durée de vie de 50 ans. Selon le document« 2011 ASHRAE Handbook HVAC Applications », au chapitre 37 « Owning and Operating Costs » une durée de vie de l'ordre 

de 24 ans pour les pompes à chaleurs commerciales air-eau devrait être considérée. En résidentiel, on considère que la durée de vie de la pompe à chaleur (PAC) géothermique est de 15 à 25 ans, ce qui est supérieur la durée de vie moyenne d'une PAC air-air qui est d'environ 12 à 15 années. L'utilisation d'une durée de vie beaucoup plus courte pour la PAC modifierait significativement le flux de référence des systèmes géothermiques « liquide-air » et « liquide-eau » et les conclusions indiquées à la page 31. Notons que l'annexe C mentionne une durée de vie de 20 ans dans pour les PAC mais il n'est pas clair si le flux de référence est pondéré en conséquence.

6. Il est supposé que les PAC, d'une puissance nominale de 10 kW, fournissent 20 000 kWh par année en énergie de chauffage. Peu d'information dans le rapport sont fournies pour expliquer les choix de conception et les hypothèses de travail. Une approche alternative aurait été de sélectionner une PAC ayant une capacité moindre avec un chauffage d'appoint électrique dans l'air puisé. Ceci aurait permis de réduire l'ampleur de l'installation mécanique et probablement la taille de l'échangeur souterrain tout en fournissant l'essentiel des économies d'énergie. Cette stratégie de conception aurait probablement modifié le calcul d'inventaire.

7. Pour les systèmes géothermiques, le remplacement du fluide caloporteur dans l'échangeur souterrain est généralement effectué aux 5 à 10 ans. À la lecture du rapport, il n'est pas clair si une durée de vie de 50 ans a été utilisée pour le fluide caloporteur. Si une durée de vie de 50 ans a été utilisée, l'indicateur eutrophisation aquatique et les conclusions qui y sont associées seraient à revoir.

8. L'annexe C détaille les « processus écoinvent » impliqués dans la construction de l'échangeur géothermique. Notons que l'utilisation du méthanol a été retenue bien que le propylène glycol est probablement davantage utilisé. Par ailleurs, le forage lui-même et la disposition des déblais ne sont pas détaillés dans ce « processus écoinvent ». Le forage requiert un équipement lourd qui consomme des quantités importantes d'hydrocarbures. Un coût environnemental est également associé à la disposition des déblais de forage. Si ces processus importants n'ont effectivement pas été pris en compte, les conclusions associées à la construction des l'échangeur souterrain seraient à revoir.

### 3 COMMENTAIRES SPÉCIFIQUES

Page iv : Au dernier paragraphe, il n'est pas clair pour le lecteur si les systèmes thermosolaires évalués sont ceux permettant de chauffer l'air ambiant ou l'eau de consommation ou les deux.

Page v : Voir le commentaire général sur la durée de vie du système géothermique.

Page v : Le facteur d'équivalence entre un mégajoule et un kWh est erroné. Vérifier que ceci n'est qu'une erreur de frappe et qu'il n'y a pas de répercussion sur l'ensemble de l'étude.

Page vii : Au premier paragraphe : « ... on constate que la production décentralisée de 1 MJ d'énergie provenant du réseau permet, ... ». Si la production est décentralisée, elle ne provient pas alors du réseau.

Page vii : Selon la consommation de 0,06 MJ par MJ produit pour le système thermosolaire à collecteurs plats, il s'agit d'un équipement avec une valeur de COP de 17. Il existe sur le marché canadien des systèmes plus performants avec des valeurs de COP avoisinant 27.

Page xiv : Mettre les chiffres 2 et 4 en indice pour CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O.

Page 3 : Voir le commentaire de la page iv.

Page 3 : La référence Marcotte, 2011 est identifiée dans les références comme datant de 2009.

Page 3 : Considérant que les changements majeurs dans les modes de chauffage ont plus tendance d'arriver lorsque l'utilisateur s'approvisionne auprès d'une forme d'énergie à forte teneur en carbone (mazout léger, gaz naturel), ne serait-il pas plus pertinent de considérer une de ces sources d'énergie plutôt que l'électricité comme scénario de référence ? Sinon, l'étude devrait être positionner sur le type de système de production d'énergie qui devrait être employé lors d'un changement d'une de ces sources d'énergie à forte teneur en carbone vers une source plus verte.

Page 7 : Premier paragraphe de la section 2.2.3.1, l'unité de surface devrait être en m<sup>2</sup>.

Page 8 : Pourquoi le rendement du système de capteur solaire à plat est différent (7 765 MJ/an) que celui présenté à la page précédente (7 667 MJ/an) ? Valider que cette différence n'a pas engendrée d'erreur dans l'étude.

Page 9 : Pourquoi l'angle d'inclinaison du capteur solaire thermique à tubes sous vide est

<p>Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ORéf.: 068-B-0004302-001-ENR-0002-00</p> <p>23 mars 2013</p> <p>différent de l'angle d'inclinaison du capteur solaire plat ? Ne faut-il pas considérer chaque système dans ses conditions optimales d'opération.</p> <p>Page 11 : Voir le commentaire général sur la durée de vie des systèmes géothermiques.</p> <p>Page 15 : Les processus d'emballage ont été exclus en raison de l'absence de données. Il aurait fallu avoir une analyse de sensibilité sur ce mode de gestion des données manquantes pour valider le caractère négligeable de ces processus sur chacun des systèmes étudiés. Les systèmes solaires devraient avoir un emballage plus imposant durant la phase de transport et de distribution. Il aurait fallu prendre un type d'emballage d'un autre système afin de valider l'hypothèse.</p> <p>Page 15 : Il n'est pas clair sur le forage des puits géothermiques, et donc la combustion de carburant par les équipements, est pris en considération.</p> <p>Page 19 : Voir le commentaire général sur la durée de vie des systèmes géothermique.</p> <p>Page 20 : Au tableau 2-4, il est question à différents endroits d'eau déminéralisée et à d'autres endroits d'eau. Est-ce qu'il y a une différence ?</p> <p>Page 20 : Pour les systèmes géothermiques, l'étude parle de glycol pour l'antigel tandis que pour les systèmes thermiques à circulation de fluide, l'étude parle de propylène glycol pour l'antigel. Y a-t-il une différence ?</p> <p>Page 20 : Quelle est la durée de vie du liquide caloporteur ?</p> <p>Page 23 : Premier paragraphe : « ... source biogénique (produit par la décomposition... »</p> <p>Page 31 : Revoir les conclusions du dernier paragraphe si des modifications sont apportées à la durée de vie des systèmes géothermiques.</p> <p>Page 32 : Expliquer davantage comment la modélisation du système intégré d'électricité a été faite. Y a-t-il une distinction pour le réseau de l'Ontario, ou toute l'Amérique du Nord est vue comme un tout ? Il pourrait être pertinent de faire des scénarios de sensibilité selon les différents mix énergétiques possibles dans le contexte nord américain.</p> <p>Page 32 : Expliquer comment le lessivage des produits de préservation des poteaux de bois est modélisé. Il s'agit là d'un élément affectant significativement les résultats et aucune information n'est donnée sur la manière dont la modélisation est faite.</p> <p>Page 32 : Donner le taux de fuite (avec une référence) des frigorigènes dans les systèmes.</p> <p>Page 33 : Pour l'indicateur d'eutrophisation aquatique, une explication est donnée relativement aux systèmes mécaniques, biologiques et chimiques de traitement des eaux en spécifiant qu'il s'agit là de systèmes représentatifs du contexte nord-</p>	<p>Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ORéf.: 068-B-0004302-001-ENR-0002-00</p> <p>23 mars 2013</p> <p>américain. Or au Québec plusieurs systèmes, notamment dans les grandes villes et donc représentant la situation pour une majorité de Québécois, n'incluent pas de traitement biologique. Pour situer l'étude au Québec, la modélisation du traitement des eaux usées devrait être revue.</p> <p>Page 33 : Au dernier paragraphe de la section sur l'étape de fin de vie : « ... gaz réfrigérants à l'air durant l'étape d'exploitation sont en cause... ». Il s'agit d'une discussion sur l'étape de fin de vie.</p> <p>Page 33 : En plus de la masse des composantes comme paramètre clé, il faudrait également prendre en considération la provenance ce qui permettrait de prendre indirectement en considération le mix énergétique dans les paramètres clés.</p> <p>Page 35 : Voir le commentaire de la page 32 sur la modélisation du lessivage des poteaux.</p> <p>Page 35 : L'impact en fin de vie du propylène glycol semble avoir un impact important. L'étude fait mention d'un remplacement de 2,5 fois durant une période de 25 ans. Pour les systèmes géothermiques de 50 ans, il n'est pas fait mention de remplacement du liquide caloporteur. Il faudrait ajuster les hypothèses sur ce liquide pour chaque système et justifier la durée de vie du liquide caloporteur.</p> <p>Page 36 : Voir le commentaire de la page 33 sur la provenance des composantes comme paramètre clé.</p> <p>Page 36 : En plus de commenter sur les conséquences positives de l'accroissement de la durée de vie des capteurs et des réservoirs, les auteurs sont invités, afin de guider adéquatement le décideur, à regarder tous les cas de figure possible, dont une durée de vie moindre, et non pas uniquement mettre de l'avant les éléments permettant d'améliorer la performance d'un système. Le décideur a besoin de savoir également les circonstances qui feraient en sorte que sa décision ne serait plus avantageuse d'un point de vue environnemental.</p> <p>Page 38 : Voir le commentaire de la page 33 sur la provenance des composantes comme paramètre clé.</p> <p>Page 38 : Voir le commentaire de la page 36 sur les recommandations à faire quant à des variations dans la durée de vie des équipements.</p> <p>Page 39 : L'utilisation de la règle des incertitudes sur les modèles indique qu'il faut un ordre à deux ordres de grandeur d'écart entre les résultats de deux systèmes pour les départager selon la qualité des écosystèmes. Il s'agit là, selon les réviseurs d'une approche de gestion qu'il faut utiliser avec discernement. Ainsi, pour cet indicateur et les résultats pour le réseau d'Hydro-Québec et le système thermosolaire à collecteur à air, l'écart est de 89%, soit presque, à 1% près, un ordre de grandeur.</p>
---	---



<p>Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ORéf.: 068-B-0004302-001-ENR-0002-00</p> <p>23 mars 2013</p> <p>Page 41 : Il serait possible dans ce contexte, compte-tenu également de la faible différence entre tous les autres systèmes, de déterminer qu'il y a une différence significative dans ce cas et pour cet indicateur.</p> <p>Page 41 : À la page 39, on mentionne que les incertitudes font en sorte que l'on ne peut pas partager entre les systèmes pour la qualité des écosystèmes, mais à la page 41, on indique que le système thermosolaire à collecteur à air présente un bénéfice environnemental potentiel pour tous les indicateurs, y compris la qualité des écosystèmes. Il faudrait avoir de la cohérence dans l'interprétation des résultats.</p> <p>Page 42 : Le Tableau 3-1 devrait être scindé en deux tableaux, un présentant l'interprétation qui peut être faite des résultats en raison des incertitudes sur les modèles et le second en raison des inversions possibles dans les conclusions par les incertitudes sur les données. Présenter de la manière actuelle, les pourcentages dans le tableau ne font référence uniquement à l'écart entre l'impact de l'énergie du réseau et celle d'un des systèmes décentralisés mais l'interprétation des cellules ombragées fait également appel à l'incertitude sur les données. Il manque une étape d'interprétation des résultats des analyses pour le lecteur.</p> <p>Page 47 : « ... le scénario construit à partir du système solaire à collecteur à air (2C) et le scénario ... »</p> <p>Page 48 : Les dernières phrases du dernier paragraphe devraient être revues pour mieux expliquer le point que veulent mettre de l'avant les auteurs de l'étude.</p> <p>Page 51 : Il y aurait lieu de revoir les hypothèses faites pour la climatisation. La modélisation a été faite à partir de travaux académiques français. Le choix d'utiliser trois climatiseurs de 18 000 BTU pour cette surface pourrait être remis en question. Il s'agit là d'un élément à fort jugement personnel. Possiblement que deux climatiseurs de 18 000 BTU pourraient également être suffisant. Une analyse de sensibilité sur ce paramètre pourrait être requise ici pour mettre plus de robustesse sur les conclusions qui en découlent de cette section.</p> <p>Page 51 : Il faudrait justifier la durée de vie de 12 ans prise en considération pour les climatiseurs. La majorité des fabricants de climatiseurs offrent des garanties de 5 ans sur leurs équipements. Peut-on à partir de ceci justifier une durée de vie moyenne de 12 ans ?</p> <p>Page 51 : Le scénario de référence n'est pas un scénario considérant la climatisation. Il n'y a pas d'équivalence fonctionnelle pour cette comparaison. Il n'est donc pas approprié de maintenir ce scénario de référence dans cette section. Il faudrait présenter uniquement les résultats avec l'ajout de la climatisation au scénario de référence.</p>	<p>Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle ORéf.: 068-B-0004302-001-ENR-0002-00</p> <p>23 mars 2013</p> <p>Page 51 : Le choix du scénario de référence devrait prendre en considération les nouveaux équipements de climatisation murale multizone (on parle dans l'étude de 3 climatiseurs) qui permettent également de chauffer l'hiver avec une meilleure performance énergétique comparativement au chauffage par plaques électriques.</p> <p>Page 51 : Bien que le système géothermique liquide-air soit le plus intéressant, il y aurait lieu de mentionner que le système géothermique liquide-eau demeure également une alternative intéressante.</p> <p>Page 53 : Dans la section « Globalement, on retient que ... », nuancer les conclusions selon la manière dont les auteurs traitent de l'incertitude sur les modèles pour la qualité des écosystèmes.</p> <p>Page 53 : Dans la section « Globalement, on retient que ... », nuancer les conclusions selon pour faire ressortir également le système géothermique liquide-eau.</p> <p>Page 53 : Retirer, dans la section 3.4, la mention sur l'amelioration de la qualité des données suite à la revue critique. Une collecte de données spécifique ne doit pas être une procédure découlant de la revue critique. Il en va du choix des auteurs de l'étude, selon les objectifs visés, de choisir de réaliser ou non une collecte de données spécifique.</p> <p>Page 54 : L'interprétation suite à la comparaison des méthodes d'impacts devrait être revue. Il y a des inversions dans les résultats. Malgré ces inversions, les auteurs mentionnent que les tendances dans les résultats présentés précédemment sont valides. Il y a lieu de se questionner sur l'utilité de cette comparaison si malgré des différences les conclusions sont maintenues.</p> <p>Page 54 : Si la nouvelle méthode Impact World semble plus rapprochée de la méthode Impact 2002+, notamment pour l'eutrophisation aquatique, pourquoi ne pas avoir utilisé cette méthode dans l'étude plutôt que Impact 2002+. C'est la seule allusion dans l'étude à cette nouvelle méthode d'impacts. Les auteurs devraient se questionner sur la pertinence d'en parler ici.</p> <p>Page 55 : Les performances issues des sous-estimations présentées dans les trois points de la page 55 sont déjà celles que l'on peut voir à la figure 3-6.</p> <p>Page 56 : Pourquoi ne pas avoir cherché s'il existe une valeur du COP inférieure à 3,0 qui rendrait les systèmes géothermiques moins intéressants. Le décideur a besoin de savoir également les circonstances qui feraient en sorte que sa décision ne serait plus avantageuse d'un point de vue environnemental.</p> <p>Page 56 : « ... la géothermie reste derrière les systèmes solaire thermique à collecteur à air,</p>
--	---

peu importe ... »

Page 57 : Est-ce que les interprétations sur les rendements et les durées de vie prennent en considération les incertitudes sur les modèles ? ➡

Page 60 : Prendre en considération l'incertitude sur les modèles pour la qualité des écosystèmes dans les recommandations de la section 3.7.2. ➡

## 4 ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ À LA NORME ISO 14044

### 1- EXIGENCES GÉNÉRALES

1.A- Les résultats et conclusions de l'ACV doivent être communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris	De manière globale, les résultats présentés sont complets. Il pourrait y avoir toutefois des ajustements sur le traitement uniforme des interprétations des résultats en fonction des incertitudes sur les modèles.
1.B- Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limites doivent être transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV	La modélisation de lessivage des produits de préservation du bois n'est pas suffisamment présentée compte-tenu de l'impact que ce processus semble avoir sur le système.
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
1.C- Le rapport doit permettre d'utiliser les résultats et l'interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude	Les paramètres clés identifiés pour chacun des systèmes étudiés (une partie du premier objectif de l'étude) ne sont pas suffisamment détaillés pour permettre au décideur une utilisation concrète des résultats.
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	

### 2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION

#### 2.A ASPECTS GÉNÉRAUX

2.A.1- Identification du commanditaire et l'realisateur de l'étude ACV	Hydro-Québec- Unité environnement et développement durable
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
2.A.2- Date du rapport	Septembre 2012
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.A.3- Indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Précisée dans la mise en contexte en page 1.
2.B OBJECTIF DE L'ÉTUDE		
2.B.1- Raisons ayant conduit à l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Précisée dans la mise en contexte en page 1.
2.B.2- Applications envisagées de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 2 1- Améliorer la compréhension des systèmes étudiés 2- Cerner des pistes d'amélioration pour l'option de mesurage net pour autoproducteurs 3- Contribuer à une réflexion plus large sur la question de l'efficacité énergétique au Québec.
2.B.3- Public concerné	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 2 : Les résultats de l'étude pourront être divulgués publiquement
2.B.4- Indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Précisée en page 28.
2.C CHAMP DE L'ÉTUDE		
2.C.1 FONCTION		
2.C.1- La fonction est clairement définie	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 10 : La fonction principale de chaque système consiste à produire de l'énergie thermique se destinant au chauffage de l'air ou de l'eau sanitaire.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.C.1.i- Des indications quant aux caractéristiques de performance de la fonction sont données	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les caractéristiques de performance sont présentées au tableau 2-1.
2.C.1.ii- Toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons est traitée	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 12 : Les systèmes étudiés peuvent comporter des fonctions secondaires de chauffage et climatisation ou de chauffage de l'air et de l'eau. La section 2.4 aborde les matières dont ces fonctions secondaires sont traitées.
2.C.2 UNITÉ FONCTIONNELLE		
2.C.2- L'unité fonctionnelle est clairement définie	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 11 : Produire 1 MJ d'énergie thermique se destinant soit au chauffage des espaces ou à celui de l'eau sanitaire, au Québec en 2011.
2.C.2.i- Le choix de l'unité fonctionnelle est cohérent avec les objectifs et le champ de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'étude de systèmes répondant à une telle unité fonctionnelle permet d'atteindre les objectifs et le champ de l'étude.
2.C.2.ii- Les flux de référence pour chaque scénario sont clairement établis et en accord avec la définition de l'unité fonctionnelle	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le Tableau 2-1 présente les flux de référence pour les systèmes à l'étude.
2.C.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME		
2.C.3- Les frontières du système doivent être clairement définies	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La section 2.5 présente les frontières des systèmes.
2.C.3.i- Les omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de données sont clairement discutées	<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le tableau 2-2 présente les processus et sous-processus inclus et exclus pour les systèmes considérés. Toutefois, l'exclusion des processus d'emballage en raison de l'absence de données aurait dû être validée.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.C.3.ii –Les intrants et extrants énergétiques et matériels sont définis et quantifiés	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>L'annexe C présente l'ensemble des processus considérés dans l'étude ainsi que les quantités pour chacun d'eux.</div>
2.C.3.iii –Les hypothèses sur la production d'énergie sont présentées et adéquates par rapport aux frontières du système de l'étude	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>La section 2.6 en page 17 explique comment les mélanges énergétiques sont pris en considération selon qu'il s'agisse de processus d'avant-plan ou d'arrière-plan.</div>
2.C.4 CRITÈRES D'ALLOCATION	
2.C.4 – Les critères d'allocation (massique, énergétique et environnemental) et les hypothèses pour l'introduction initiale des intrants et des extrants sont définies	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Le recyclage des métaux est exclu de l'étude car il est considéré faire partie d'un autre système.</div>
2.C.4.i. L'effet de la sélection des critères d'allocation sur les résultats est discuté	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Cette règle du cut-off n'est pas reprise dans la discussion des résultats, mais les résultats obtenus ne justifient pas une telle discussion. Il n'y a pas de manque dans ce cas par rapport à la norme.</div>
2.D INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	
2.D.1 – La méthodologie utilisée pour la collecte de données est expliquée	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>La section 2.6 détaille la collecte de données et l'emploi de la base de données écovienvt dans le cadre de cette étude</div>
2.D.2 – Une description qualitative et quantitative des processus élémentaires est faite	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Dans l'ensemble du chapitre 2 et de l'annexe C, les processus sont présentés.</div>
2.D.3 – Les sources de la documentation consultée sont données	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Les références sont données.</div>

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.D.4 – Le mode de calcul de l'inventaire est présenté	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Page 21 : Les auteurs ont employés le logiciel SimaPro 7.2.</div>
2.D.5 – La qualité des données utilisées est évaluée	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>La qualité des données est évaluée de manière qualitative à l'annexe D selon les critères de fiabilité et de représentativité définis à la section 2.8.2.</div>
2.D.6 – Une explication est fournie sur la manière dont les données manquantes sont traitées	<div><input type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Par manque de données, le processus sur les emballages dans les différents systèmes a été exclu sans donner plus de précision sur l'impact que ceci pourrait avoir sur les résultats.</div>
2.D.7 – Une analyse de sensibilité est faite afin de raffiner les frontières du système	<div><input type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Aucune analyse de sensibilité n'a été faite. Une telle analyse aurait du être faite afin de valider l'exclusion du processus d'emballage par manque de données.</div>
2.D.8 – Les règles d'allocation sont documentées et justifiées	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Le recyclage des métaux est exclu par la règle du cut-off. Il s'agit d'une approche classique.</div>
2.D.9 – Les règles d'allocation sont appliquées de manière uniforme	<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Cette règle semble être appliquée de manière uniforme.</div>
2.E ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE	
2.E.1 – Les modes opératoires, les calculs et les résultats de l'évaluation du cycle de vie sont présentés	<div><input type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div> <div>Les calculs pour l'ÉICV ont été faits à l'aide du logiciel SimaPro 7.3 et de la méthode d'évaluation d'impact 2002+. L'annexe E présente l'ensemble des résultats de l'ÉICV. Les auteurs mentionnent à la fois SimaPro 7.2 et SimaPro 7.3. Un ajustement est requis.</div>

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.E.2- Les résultats de l'ÉCV respectent les objectifs et le champ de l'étude	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'identification des paramètres clés est trop générale pour permettre de cerner des pistes d'amélioration pour l'option de mesurage net pour autoproducteurs.
2.E.3- La relation entre les résultats de l'ÉCV et les objectifs et le champ de l'étude est discutée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Des conclusions intermédiaires sont faites suite aux différences analyses pour faire le lien avec les objectifs de l'étude.
2.E.4- La relation entre les résultats de l'ÉCV et les résultats de l'inventaire est discutée	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les liens sont faits de manière très générale. Les contributeurs sont identifiés comme des grandes classes d'activités plutôt que d'identifier les activités et processus spécifiques les plus impactant.
2.E.5- Les catégories d'impacts et les catégories d'indicateurs sont définies, justifiées et référencées	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 22 et 23.
2.E.6- Une description de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisées, y compris toutes les hypothèses et les limites, est donnée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 22 et 23.
2.E.7- Une description de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et ailleurs dans l'ÉCV est faite de même qu'une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 22 et 23. Aucune normalisation n'a été faite.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.E.8- Une indication est faite que les résultats de l'ÉCV soient des expressions relatives et qu'ils ne présentent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 59 : Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans le contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible. Page 60 : Les résultats de l'ACV présentant des impacts environnementaux potentiels et non réels.
2.F INTERPRÉTATION DU CYCLE DE VIE	
2.F.1- Les résultats sont clairement présentés et interprétés	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les processus contributeurs ne sont pas clairement identifiés lorsque les profils environnementaux sont présentés. On parle plutôt de grandes catégories d'activités qui peuvent englober plusieurs processus. D'avantage de détails sur les processus impliqués permettrait une meilleure utilisation de l'étude selon les objectifs de cette dernière. Des fois on ne distingue pas les systèmes en raison de l'incertitude sur une catégorie d'impact (qualité des écosystèmes) et d'autre fois on fait une telle distinction avec les mêmes résultats. Il y a un manque d'uniformisation dans l'interprétation des résultats.
2.F.2- Les hypothèses et les limites associées à l'interprétation des résultats sont présentées en relation avec la méthodologie et les données	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les limitations de l'étude sont présentées.
2.F.3- Les résultats sont interprétés en fonction d'une évaluation de la qualité des données	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Des fois on ne distingue pas les systèmes en raison de l'incertitude sur une catégorie d'impact (qualité des écosystèmes) et d'autre fois on fait une telle distinction avec les mêmes résultats. Il y a un manque d'uniformisation dans l'interprétation des résultats.
2.F.4- L'interprétation fait état d'une transparence totale en termes de choix de valeurs, de justifications et d'appréciations d'experts	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Des fois on ne distingue pas les systèmes en raison de l'incertitude sur une catégorie d'impact (qualité des écosystèmes) et d'autre fois on fait une telle distinction avec les mêmes résultats. Il y a un manque d'uniformisation dans l'interprétation des résultats.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.G REVUE CRITIQUE	
2.G.1- Les noms et les affiliations des réviseurs sont clairement identifiés	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée	Comme il s'agit du rapport avant la revue critique, les noms des membres du comité de revue critique n'étaient pas connus des auteurs. Ils devraient être ajoutés dans les versions suivantes.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence non applicable	
2.G.2- Le(s) rapport(s) du comité de revue critique est (sont) annexé(s) au rapport de l'étude	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée	Ce premier rapport de revue critique devra être annexé au rapport d'étude ACV.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence non applicable	
2.G.3- Les réponses des auteurs aux commentaires du comité de revue critique sont annexées au rapport de l'étude	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée	Les réponses des auteurs à ce premier rapport de revue critique devront être annexées au rapport de l'étude ACV.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence non applicable	

**3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC**

3.A.- Une analyse des flux de matière et d'énergie est faite afin d'en justifier leurs inclusions ou exclusions	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Une telle analyse n'a pas été faite, mais il n'y a pas suffisamment de flux exclus pour que cet usage respecte de l'exigence de la norme.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.B.- Une évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées est faite	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Les auteurs en page 25 mentionnent qu'il y a eu analyses de cohérence et de complétude tout au long de l'étude.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.C.- Une description de l'équivalence des systèmes comparés est faite	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Les sections 2.2 et 2.3 définissent les systèmes et leur équivalence entre eux en termes de fonction et de quantité pour répondre à l'unité fonctionnelle.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	

3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC	
3.D.- Le processus de revue critique est décrit	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Le processus est décrit en page 28.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.E.- Une évaluation de la complétude de l'ÉICV est faite	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Les auteurs en page 25 mentionnent qu'il y a eu analyse de complétude tout au long de l'étude.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.F.- Une mention est faite de l'acceptation internationale des indicateurs de catégorie utilisée, de même qu'une justification de leur utilisation	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Une telle mention est faite en page 21.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.G.- Une explication est donnée quant à la validité scientifique et technique de même que la pertinence environnementale des indicateurs de catégories utilisés	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Les auteurs font référence à un article scientifique présentant la méthode d'impact 2002+.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.H.- Les résultats d'une analyse d'incertitude et d'une analyse de sensibilité sont présentés	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée	Les résultats de ces analyses sont présentés à l'annexe E et discutés dans le rapport.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
3.I.- Si des différences sont trouvées par rapport aux résultats de d'autres études similaires, une évaluation de la signification de ces différences est faite	
<input type="checkbox"/> Exigence respectée	Aucune mention n'est faite par rapport à des études similaires. Les auteurs devraient, en l'absence de telles études, mentionner qu'il s'agit d'une première étude et qu'il n'est pas possible de faire de parallèle avec d'autres résultats.
<input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée	
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée	
<input type="checkbox"/> Exigence non applicable	



## Réponses aux réviseurs

### Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle

#### Auteurs

Chaire internationale sur le cycle de vie  
Geneviève Martineau, ing., M.Sc.A.; Marie-Luc Arpin, M.Sc.

#### Date

Avril 2013

Le présent document présente les réponses du CIRAIG aux commentaires des réviseurs sur le rapport « ACV de filières de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle ».

Les réponses sont présentées dans l'ordre, et identifiées par les numéros de commentaires du comité de revue (rapport final du 23 mars 2013). Se référer à ce rapport pour connaître la teneur des questions et commentaires.

No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
<i>Commentaires généraux</i>	
1	Pour le système solaire à collecteurs plats, le réservoir à eau chaude de 600 litres initialement modélisé (tiré du processus générique européen) a été remplacé par deux réservoirs de 60 gallons (227 litres) de manière à mieux correspondre à la technologie vendue au Québec et au Canada.
2	Les systèmes solaires employés dans la modélisation sont issus d'une étude terrain exhaustive, bien qu'europpéenne. Des détails quant à l'origine des informations ayant servi à la modélisation ont été ajoutés à la section 2.2. À la suggestion du comité de révision, la taille du système thermosolaire à collecteurs plats a néanmoins été modifiée pour une surface de 6 m <sup>2</sup> . Différentes surfaces de captage ont également été évaluées en analyse de sensibilité afin de changer la proportion d'énergie fournie par un système solaire à une résidence.
3	Le réservoir d'eau modélisé était de 2000 litres. Le texte du paragraphe 2.2.3.2 a été corrigé pour refléter la modélisation. Différentes surfaces de captage ont également été évaluées en analyse de sensibilité afin de changer la proportion d'énergie fournie par un système solaire à une résidence.
4	La durée de vie du système thermosolaire à capteur à air vitrés a été fournie par MC2, le fabricant du ESOLAIR 2.0 et distributeur au Québec. Une analyse de sensibilité sur la durée de vie de ce type de système a été ajoutée pour vérifier son effet sur les conclusions.
5	La durée de vie de la boucle externe et du plancher radiant était en effet de 50 ans. Par contre, toutes les autres composantes disposaient d'une durée de vie de 20 ans et avaient été modélisées en conséquence. Une colonne a été ajoutée au Tableau 2-1 afin de clarifier la durée de vie considérée pour les diverses composantes.  Il est à noter que, pour tous les systèmes concernés (solaires, géothermiques et de référence), la durée de vie des réservoirs à eau chaude a été abaissée à 12 ans pour correspondre aux normes en vigueur. Elle avait à l'origine été fixée à 20 ans.
6	Les choix de conception sont issus de la donnée générique suisse ecoinvent, adaptée au contexte québécois. Des informations quant à l'origine de la donnée suisse sont présentées à la sous-section 2.6.1.  L'approche alternative suggérée aurait effectivement pu faire partie des systèmes modélisés. Elle



No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
	<p>aurait cependant exigé une collecte de données spécifiques qui dépassait le mandat de l'étude. Du texte précisant ce fait a été ajouté à la sous-section 2.2.</p>
7	<p>Les systèmes géothermiques possèdent : 1) un fluide caloporteur (eau et un antigel, qui peut être constitué de méthanol, éthylène glycol, propylène glycol ou éthanol), qui circule dans la boucle souterraine; 2) un gaz frigorigène (HFC-410a, approximé dans le modèle par du R134a), qui circule entre les deux échangeurs de chaleur (double expansion), à l'intérieur de la pompe à chaleur. Il a été considéré que le fluide caloporteur de la boucle extérieure n'est pas remplacé au cours des 50 ans de vie du système. Cette information a été validée par deux spécialistes en géothermie au Québec (Lambert (2013) et Fontaine (2013)).</p> <p>Un guide technique récent sur la géothermie ne fait par ailleurs aucune mention de remplacement du fluide caloporteur au cours de la vie du système (Ontario Ministry of Environment, 2013; Technical Bulletin : Earth Energy Systems in Ontario, section 3.3 Heat Transfer Fluid including Refrigerant, <a href="http://www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/stdprod_103661.pdf">http://www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/stdprod_103661.pdf</a>).</p> <p>En effet, le remplacement du fluide caloporteur n'est nécessaire que lorsque la purge initiale des conduits souterrains n'a pas été réalisée de manière convenable, ou lorsque le fluide utilisé est composé d'eau d'un puits artésien, et qu'il ne contient aucun agent antibactérien et anticorrosion. Dans ce cas, la microflore finit par biodégrader l'antigel, produisant des boues et gaz qui, s'ils ne sont pas purgés, endommagent le système de pompage. Au contraire, si le système a été bien purgé au départ et que le liquide caloporteur est constitué d'eau déminéralisée et les additifs requis, aucun remplacement ne doit être effectué tout au long de la durée de vie du système (Fontaine, 2013).</p> <p>Pour le cas modélisé, il a donc été choisi de considérer que l'installation était faite dans les règles de l'art et, par conséquent, de conserver l'hypothèse voulant que le fluide caloporteur ne soit pas remplacé au cours de la vie des systèmes géothermiques. Voir la réponse au commentaire général n°8 pour plus de détail sur la composition du fluide caloporteur.</p> <p>La gestion du fluide caloporteur a également été revue à l'issue de récents échanges avec des puisatiers (Veilleux, 2013; Massé, 2013) : les systèmes géothermiques sont encore trop récents pour que leur démantèlement soit connu. Il n'existe à l'heure actuelle aucune réglementation obligeant le propriétaire à gérer le fluide caloporteur d'une manière particulière. Les options possibles sont de : laisser le fluide en place dans la boucle et l'obturer; pomper le liquide et l'envoyer se faire traiter par une entreprise spécialisée; rejeter le liquide à l'égout. Pour des raisons de coûts et de simplicité, il a été présumé que le liquide caloporteur serait laissé en place dans la boucle souterraine. Ainsi, plutôt que de modéliser un traitement en usine d'épuration, le méthanol est présumé émis entièrement au sol (dans un horizon de temps plus ou moins long) [ce paragraphe a été ajouté comme note au Tableau 2-2].</p> <p>En ce qui a trait au gaz frigorigène à l'intérieur de la pompe à chaleur, il n'est pas entièrement remplacé, mais des ajouts périodiques de gaz doivent être faits pour compenser les émissions fugitives. La quantité ajoutée (et donc perdue par fuites) a été tirée de la donnée générique <i>ecoinvent</i> (Heck, 2007). Des précisions ont été ajoutées au Tableau 2-5. À l'annexe C, les processus représentant l'étape d'exploitation « E01_Système géothermique eau-air » et « E02_Système géothermique eau-eau » ont été mieux documentés afin de clarifier le remplacement du gaz frigorigène de la boucle secondaire (à l'intérieur de la pompe à chaleur).</p>
8	<p>Le texte suivant a été ajouté à la sous-section 2.2.2 :</p> <p><i>« Selon le puisatier en charge de l'installation de la boucle souterraine, différents liquide caloporteurs sont utilisés. On retrouve au Québec le méthanol, le propylène glycol, l'éthylène glycol et l'éthanol, toujours à environ 30% dans de l'eau (déminéralisée idéalement). Chaque substance vient avec ses avantages et inconvénients. Certains sont plus toxiques ou inflammables, d'autres plus visqueux (nécessitant une plus grande énergie de pompage) ou plus coûteux (Fontaine, 2013).</i></p> <p><i>D'après les puisatiers consultés (Veilleux, 2013; Massé, 2013), le méthanol est l'antigel qui est majoritairement utilisé dans le domaine résidentiel, notamment parce que les entreprises de climatisation qui se sont approprié ce secteur privilégient la performance énergétique du fluide caloporteur avant tout. »</i></p> <p>Tel que mentionné au point précédent, des agents antibactériens et anticorrosion sont également ajoutés au mélange pour en améliorer la stabilité. Une collecte de données spécifiques serait</p>



No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
	<p>nécessaire pour connaître la composition exacte des divers liquides caloporteurs utilisés au Québec, ce qui dépasse le cadre du présent projet.</p> <p>Par conséquent, le fluide caloporteur a été modélisé par un mélange d'eau déminéralisée et de méthanol uniquement. Toutes les mentions du propylène glycol dans le rapport ont été modifiées en conséquence.</p> <p>Le processus « I00_système boucle-pompe » inclut les infrastructures des équipements de forage ainsi que la consommation de diesel et les émissions générées lors de l'opération (tiré du processus <i>ecoinvent</i> « Borehole heat exchanger 150m »). Une précision a été ajoutée à la sous-section 3.1.2.</p>
<b>Commentaires spécifiques</b>	
Page iv	La précision suivante a été ajoutée au sommaire, ainsi qu'à la section 2.2 : « Les systèmes thermosolaires évalués ont été sélectionnés de manière à refléter ce large éventail de possibilités : le système à collecteurs plats permettant de chauffer uniquement l'eau, le système à collecteurs à air vitré chauffant uniquement l'air et le système à tubes sous vide assurant une part des deux. »
Page v (1)	Sommaire. Le terme durée de vie « globale » a été ajoutée à la description des systèmes à l'étude, de même que la note de bas de page suivante : « La durée de vie « globale » d'un système est basée sur la longévité de sa principale composante, soit la boucle souterraine dans le cas des systèmes géothermiques et les capteurs solaires dans le cas des systèmes solaires thermiques. Les autres composantes des systèmes peuvent cependant avoir des durées de vie différentes. La modélisation a pris en compte les spécificités de chacune. »
Page v (2)	Sommaire, note de bas de page. La valeur 0,227 a été corrigée par 0,278 (0,2777). Il s'agit d'une erreur de typographie qui n'a pas de conséquence sur la modélisation des systèmes.
Page vii (1)	Sommaire. Erreur d'édition. les mots « provenant du réseau » ont été retirés.
Page vii (2)	Sommaire. Le fait d'augmenter le COP du système solaire thermique à collecteurs plats aurait pour effet de réduire sa consommation électrique à l'étape d'utilisation. Or, cette consommation d'électricité ne contribue qu'à 1 à 6% des indicateurs évalués pour la production d'un MJ d'énergie (22% dans le cas de la <i>Qualité des écosystèmes</i> ). Une fois inclus dans le scénario de chauffage résidentiel, la consommation électrique du système solaire contribue à <u>moins de 1% de tous les indicateurs évalués</u> ( <i>Qualité des écosystèmes</i> inclus). Il n'a donc pas été jugé utile de réaliser une analyse de sensibilité sur ce paramètre.
Page xiv	Liste des abréviations et sigles. Correction effectuée.
Page 3 (1)	Paragraphe en haut de la sous-section 2.2.1. Précision ajoutée. Voir réponse au commentaire Page iv.
Page 3 (2)	Sous-section 2.2.2. Correction effectuée.
Page 3 (3)	Sous-section 2.2.1. Le choix du chauffage électrique (plinthes et chauffe-eau) comme scénario de référence permet de positionner les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique par rapport au cas le plus répandu au Québec. Bien entendu, une comparaison à des systèmes de chauffage au mazout ou au gaz naturel améliorerait les performances environnementales relatives des systèmes décentralisés, mais cette comparaison est hors du champ de l'étude, puisque le client – Hydro-Québec – désire connaître spécifiquement la performance des systèmes de production décentralisée d'énergie thermique par rapport à l'énergie issue de son réseau.
Page 7	Paragraphe 2.2.3.1. Correction effectuée.
Page 8	Paragraphe 2.2.3.1. La valeur employée dans la modélisation est de 7 765 MJ/an. Seule cette valeur a été conservée dans le texte.
Page 9	<p>Paragraphe 2.2.3.2. L'angle d'inclinaison des capteurs était donné à titre indicatif, puisqu'il n'a pas été spécifiquement utilisé dans le dimensionnement (issu des données génériques <i>ecoinvent</i>). Puisque l'angle idéal est variable au cours de l'année, il a été choisi de retirer la mention de l'angle d'installation.</p> <p><i>« Idéalement, un capteur plan doit être orienté plein Sud et incliné à un angle perpendiculaire au rayonnement solaire, soit un angle de 50° en moyenne, par rapport à l'horizontal. Mais les écarts plus ou moins importants sont envisageables, car les pertes de performance sont souvent faibles (Source :</i></p>

No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
	<i>Outils Solaires, 2012, <a href="http://outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/orientation-capteurs+a87.html#.UWw--Mp16Hc">http://outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/orientation-capteurs+a87.html#.UWw--Mp16Hc</a> ).</i>
Page 11	Tableau 2-1. Une colonne détaillant la durée de vie des composantes des systèmes a été ajoutée pour plus de clarté.
Page 15 (1)	L’emballage de carton des panneaux ESOLAIR de MC2 (Source: <a href="http://mc2energie.com/fichiers/EFMK_1_3G_installation%20fr_R4.pdf">http://mc2energie.com/fichiers/EFMK_1_3G_installation%20fr_R4.pdf</a> ) a été posé identique à celui du système solaire à collecteur plat (3,68 kg de carton/m <sup>2</sup> de panneau). À partir de la taille d’un panneau (2,62 m <sup>2</sup> ), une quantité de carton a été ajoutée au système à collecteurs à air vitrés. Les détails sont disponibles à l’annexe C.
Page 15 (2)	Tableau 2-2. Le forage des puits, incluant la combustion de diesel par les équipements et l’enfouissement des résidus de forage, est inclus dans l’étape de distribution des systèmes géothermiques. Une spécification a été ajoutée au tableau 2-2.
Page 19	Sous-section 2.6.3. Voir réponse au commentaire « Page 11 »
Page 20 (1)	Tableau 2-5. Le type d’eau utilisé dans le fluide caloporteur (initialement indiqué au tableau) était issu des modules de données générique <i>ecoinvent</i> pour lesquels les systèmes solaires thermiques exigent de l’eau déminéralisée, alors que les boucles des systèmes géothermiques requièrent de l’eau de qualité non spécifiée. Suite à des échanges avec des spécialistes en géothermie (Fontaine, 2013; Veilleux, 2013), il est ressorti que les boucles souterraines devraient toujours contenir de l’eau déminéralisée. La modélisation et le tableau 2-5 ont été modifiés en conséquence.
Page 20 (2)	Tel que mentionné au Commentaire général n°8, l’antigel est le méthanol pour les systèmes géothermiques. Le propylène glycol est l’antigel utilisé dans les panneaux solaires. La correction a été apportée au Tableau 2-5.
Page 20 (3)	Tableau 2-5. Voir réponse au commentaire général n°7. Une précision a été ajoutée au Tableau 2-1 (Caractéristique de performance et flux de référence).
Page 23	Section 2.7. Le paragraphe décrivant la considération du CO <sub>2</sub> biogénique a été retiré, puisqu’il ne s’applique pas directement à l’étude.
Page 31	Sous-section 3.1.2 – note sous figure 3-2. Le texte a été retiré.
Page 32 (1)	Sous-section 3.1.2 – Étape d’utilisation. Le texte a été modifié. La nouvelle sous-section 3.1.1 décrivant le profil environnemental du kWh distribué par Hydro-Québec permet de décrire en détail les impacts potentiels liés à la consommation électrique. L’annexe C présente également la modélisation des processus utilisés dans le système de référence.
Page 32 (2)	Sous-section 3.1.2 – Étape d’utilisation. voir réponse au commentaire « Page 32(1) ».
Page 32 (3)	Sous-section 3.1.2 – Étape d’utilisation. Précision ajoutée.
Page 33 (1)	Sous-section 3.1.2 – Étape de fin de vie. Tel que mentionné au commentaire général n°7, la fin de vie du fluide caloporteur des systèmes géothermiques a été modifiée pour une émission directe au sol. La modélisation du traitement des eaux usées ne fait donc maintenant plus partie du système. Par contre, les systèmes solaires à collecteurs plats et à tube sous vide, qui impliquent l’utilisation d’un fluide caloporteur constitué d’eau et de propylène glycol, font toujours appel au processus de traitement des eaux usées. À la sous-section 3.1.3 – Étape d’utilisation, le texte décrivant la modélisation a été modifié afin de souligner que le processus utilisé est peu représentatif du contexte québécois et qu’il faut donc prendre les résultats avec prudence.
Page 33 (2)	Sous-section 3.1.2 – Étape de fin de vie. Correction effectuée.
Page 33 (3)	Sous-section 3.1.2 – Analyse des paramètres clés. Le transport des matériaux et le lieu de production ont été ajoutés comme paramètres clés. Il n’est pas discuté davantage, car le marché des métaux est mondial et il est rare pour un acheteur de choisir sa provenance.
Page 35 (1)	Sous-section 3.1.3 – Étape d’utilisation. Voir réponse au commentaire « Page 32 (1) »
Page 35 (2)	Sous-section 3.1.3 – Étape de fin de vie. Contrairement aux boucles souterraines des systèmes

No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
	géothermiques, les systèmes solaires sont exposés à de plus importantes variantes de températures, ce qui induit une dégradation plus rapide du fluide caloporteur. Se référer à la réponse au commentaire général n°7 pour plus de détail sur les hypothèses liées aux systèmes géothermiques.
Page 36 (1)	<p>Sous-section 3.1.3 – Analyse des paramètres clés. Dans le cas des capteurs solaires à circulation de fluide, l'énergie de production des composantes ne ressort pas de manière particulière, ni leur transport. La quantité des métaux utilisés contribue par contre de manière importante aux impacts de la production. Il n'est pas discuté davantage, car le marché des métaux est mondial et il est rare pour un acheteur de choisir sa provenance.</p> <p>Une note a été ajoutée pour spécifier que ce sont les métaux qui sont à l'origine de l'impact potentiel. La masse reste donc le principal paramètre à améliorer, avec la durée de vie des systèmes.</p>
Page 36 (2)	Sous-section 3.1.3 – Analyse des paramètres clés. Une analyse de sensibilité sur la durée de vie des capteurs solaires a été ajoutée.
Page 38 (1)	Sous-section 3.1.4 – Analyse des paramètres clés. Le lieu de production des matériaux, en particulier l'aluminium, a été ajouté comme paramètre clé. Il n'est pas discuté davantage, car le marché des métaux est mondial et il est rare pour un acheteur de choisir sa provenance.
Page 38 (2)	Sous-section 3.1.4 – Analyse des paramètres clés. Une analyse de sensibilité sur la durée de vie des systèmes solaires à collecteurs à air vitrés a été ajoutée.
Page 39	Section 3.2, avant la figure 3-6. La question de la <i>Qualité des écosystèmes</i> a été traitée différemment, d'abord dans l'analyse de sensibilité comparant les résultats des méthodes IMPACT 2002+ et ReCiPe, puis en nuancant les résultats à la section 3.6 (Résumé des analyses). De cette manière, il est jugé par les auteurs que la question de l'incertitude sur cette catégorie de dommage est traitée de manière transparente, tout en évitant une confusion de la part des lecteurs sur les résultats présentés.
Page 41	Section 3.2, après la figure 3-6. La mention de l'indicateur <i>Qualité des écosystèmes</i> a été retirée.
Page 42	Tableau 3-3. Le tableau initial a été modifié et intégré à la nouvelle section 3.6 (Résumé des analyses)
Page 47	Sous-section 3.3.2, après la figure 3-7. Correction effectuée.
Page 48	Sous-section 3.3.2, juste avant la figure 3-8. Le paragraphe a été retiré, du fait qu'il portait à confusion le lecteur et n'apportait pas réellement de nouvelles informations.
Page 51 (1)	Sous-section 3.3.3. L'analyse de sensibilité a été faite à partir d'une étude française récente, pour documenter la fabrication des climatiseurs muraux, car c'est la seule étude publiquement disponible ayant été répertoriée. Il a été jugé que la composition de tels appareils ne varie pas de façon démesurée en fonction de la localisation géographique. En ce qui a trait au nombre d'appareils employés, les résultats étant linéaires, il est aisément possible de déduire quel serait le résultat si on employait deux unités plutôt que trois. Une note à ce sujet a été ajoutée dans la discussion.
Page 51 (2)	Sous-section 3.3.3. Une spécification a été ajoutée pour justifier la durée de vie de 12 ans choisie.
Page 51 (3)	Sous-section 3.3.3. Le scénario de référence a été modifié pour inclure la climatisation. Les résultats sans climatisation sont néanmoins présentés sur le graphique à titre indicatif, pour permettre au lecteur de visualiser l'effet de l'ajout de climatisation sur les indicateurs environnementaux évalués.
Page 51 (4)	Sous-section 3.3.3. Les thermopompes murales multizones permettent en effet de répondre aux besoins de chauffage et de climatisation des résidences. Cette option n'a cependant pas été incluse à l'analyse, car elle sort du champ de l'étude, dont l'objectif était d'analyser les systèmes de production d'énergie thermique décentralisée. Une note a été ajoutée à cet effet.
Page 51 (5)	Sous-section 3.3.3. Le texte a été modifié pour spécifier que le système géothermique liquide-eau demeure une option intéressante.
Page 53 (1)	Sous-section 3.3.3, encadré « Globalement... ». Les auteurs ne saisissent pas bien les nuances à apporter. En effet, l'indicateur <i>Qualité des écosystèmes</i> , bien que très incertains à cause des émissions de métaux mal caractérisées par les méthodes actuellement disponibles, ne contredit pas les résultats apportés par les autres indicateurs environnementaux considérés. Par conséquent, les conclusions avancées sont vraies, que l'on considère ou non l'indicateur <i>Qualité des écosystèmes</i> .

No	Réponse de la Chaire sur le cycle de vie
Page 53 (2)	Sous-section 3.3.3, encadré « Globalement... ». Modification effectuée.
Page 53 (3)	Section 3.4. Correction effectuée.
Page 54 (1)	Sous-section 3.5.1. Les résultats graphiques sont présentés et une discussion plus détaillée a été ajoutée.
Page 54 (2)	Tableau 3-3. La référence à IMPACT World+ a été retirée.
Page 55	Sous-section 3.5.1, sous le tableau 3-3. Commentaire sans spécification. La discussion a été détaillée.
Page 56 (1)	Sous-section 3.5.3 « Rendement des systèmes géothermiques ». L'analyse de sensibilité a été modifiée pour faire varier le COP du système géothermique de 1,5 à 5,5.
Page 56 (2)	Sous-section 3.5.3 « Rendement des systèmes géothermiques ». Correction effectuée.
Page 57	Sous-section 3.5.5 « Durée de vie des systèmes solaires thermiques à circulation de fluide ». L'écart nécessaire pour conclure quant à l'avantage d'un système sur l'autre en tenant compte des incertitudes reliées aux modèles de caractérisation a été intégré à l'analyse et est spécifié dans le texte.
Page 60	Sous-section 3.7.2 « Recommandations pour améliorer... »

Le 25 juin 2013

Monsieur Christian Turpin  
Conseiller - Performance environnementale- Chintie Environnement et développement durable  
Hydro-Québec  
75, boulevard René-Lévesque Ouest  
Montréal (Québec) H2Z 1A4

**Objet:** Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle  
O/Ref.: 068-B0004302-002-EN-R-0002-01

Cher monsieur Turpin,

Le comité de revue critique que je préside a complété la revue de l'étude ACV que vous avez demandé au CIRAG de produire pour le compte d'Hydro-Québec. Nous avons dans un premier temps questionné les auteurs de l'étude et demandé à ce que des précisions ou des corrections soient apportées à l'étude. Dans un second temps, nous avons revu la nouvelle version de cette étude ainsi que les commentaires apportés par les auteurs de l'étude à chacun des points que nous avons soulevés dans notre premier rapport de revue critique.

En tant que président de ce comité, je considère que les modifications effectuées par les auteurs de l'étude et les réponses à nos commentaires sont satisfaisantes et permettent d'assurer que cette étude, dans cette nouvelle version, répond aux exigences de la norme ISO 14044. Je tiens à vous rappeler que le travail de revue critique ne consiste pas à approuver ou non la divulgation de l'étude à un public externe. Cette décision revient aux mandataires de l'étude.

Au nom des membres du comité de revue critique, je tiens à souligner l'effort que les auteurs de l'étude ont fait afin de répondre avec satisfaction à nos commentaires et questions en lien avec la première version de cette étude. Il ne fait aucun doute pour le comité que cette deuxième version de l'étude est robuste, crédible et que l'interprétation des résultats permet une meilleure utilisation des conclusions de l'étude.

C'est donc avec plaisir que je vous transmets notre appréciation finale de l'étude ACV.

J'espère le tout à votre satisfaction.

  
Contran Bage, ing., Ph.D.

Chargé de projet- Expert en analyse du cycle de vie

DESSAU.COM

T 514.281.0100  
F 514.738.9799  
monre@dessau.com  
1080 Côte du Beaver Hill  
Brossard, Qc J2Y 1S9  
Canada

Objet : Revue critique par un comité d'experts indépendants d'une étude ACV de filières de production décentralisée d'énergie thermique à petite échelle  
O/Ref.: 068-B-0004302-001-EN-R-0002-01

25 juin 2013

RÉSUMÉ DE LA DÉCISION DU COMITÉ

TITRE DE L'ÉTUDE RÉVISÉE	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE FILIÈRES DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'ÉNERGIE THERMIQUE À PETITE ÉCHELLE
DATE DU RAPPORT	Juin 2013
AUTEUR DE L'ÉTUDE	CIRAG
COMMANDAIRE	Hydro-Québec
DATE DE LA REVUE CRITIQUE	Juin 2013
DÉCISION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE	<input checked="" type="checkbox"/> Étude est conforme aux exigences de la norme ISO 14044 <input type="checkbox"/> Étude requiert des corrections mineures conformément aux exigences de la norme ISO 14044 <input type="checkbox"/> Étude requiert des corrections majeures conformément aux exigences de la norme ISO 14044

COMPOSITION DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE

PRÉSIDENT DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE	CONTRAN BAGE, ING., PH.D. CONSEILLER EN DÉVELOPPEMENT DURABLE
RÉVISEURS	Reda Djebbar, Ph.D., P.Eng. Ingénieur senior- Énergie solaire thermique CarnegieÉnergie

Philippe Pasquier, ing., Ph.D.  
Professeur - Département des génies civil,  
géologique et des mines  
École Polytechnique de Montréal

Conformément à la section 6.3 de la norme ISO 14044, une étude doit faire l'objet d'une revue critique par un comité des parties prenantes si les résultats de l'étude peuvent être utilisés en support à une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Dans ce contexte, le travail des réviseurs est de s'assurer que l'étude est transparente et cohérente, que les données utilisées sont appropriées et en relation avec les objectifs de l'étude, que l'interprétation des résultats est en accord avec ces objectifs, que l'interprétation des résultats reflète les limites de l'étude sont scientifiquement valables, adéquates par rapport aux objectifs de l'étude et en accord avec la norme ISO 14044. Il est important de rappeler qu'une décision du comité quant au respect par l'étude des exigences de la norme ISO 14044 ne signifie pas que le comité endosse la divulgation des résultats. Une telle divulgation reste sous la décision et la responsabilité des propriétaires de l'étude.

ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ À LA NORME ISO 14044

1- EXIGENCES GÉNÉRALES	
1A- Les résultats et conclusions de l'ACV doivent être communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
1B- Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limites doivent être transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
1C- Le rapport doit permettre d'utiliser les résultats et l'interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2.A ASPECTS GÉNÉRAUX	
2A.1- Identification du commanditaire et réalisateur de l'étude ACV	Hydro-Québec- Unité environnement et développement durable
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	
2A.2- Date du rapport	Jun 2013
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION	
2A.3- indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la norme ISO 14044	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Précisée dans la mise en contexte en page 1.	
2.B OBJET DE L'ÉTUDE	
2B.1- Raisons ayant conduit à l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Précisée dans la mise en contexte en page 1.	
2B.2- Applications envisagées de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Page 2 1- Améliorer la compréhension des systèmes étudiés 2- Cerner des pistes d'amélioration pour l'option de mesurage net pour autoproducteurs 3- Contribuer à une réflexion plus large sur la question de l'efficacité énergétique au Québec.	
2B.3- Public concerné	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Page 2 : Les résultats de l'étude pourront être divulgués publiquement	
2B.4- indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Précisée en page 31.	
2.C CHAP DE L'ÉTUDE	
2.C.1 FONCTION	
2C.1- La fonction est clairement définie	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Page 11 : La fonction principale de chaque système consiste à produire de l'énergie thermique se destinant au chauffage de l'air ou de l'eau sanitaire.	

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.C.1.i - Des indications quant aux caractéristiques de performance de la fonction sont données	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les caractéristiques de performance sont présentées au tableau 2-1.
2.C.1.ii - Toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons est traitée	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 13 : Les systèmes étudiés peuvent comporter des fonctions secondaires de chauffage et climatisation ou de chauffage de l'air et de l'eau. La section 2.4 aborde les manières dont ces fonctions secondaires sont traitées.
2.C.2 UNITÉ FONCTIONNELLE		
2.C.2 - L'unité fonctionnelle est clairement définie	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 12 : Production 1 MJ d'énergie thermique se destinant soit au chauffage des espaces ou à celui de l'eau sanitaire, au Québec en 2011.
2.C.2.i - Le choix de l'unité fonctionnelle est cohérent avec les objectifs et le champ de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'étude de systèmes répondant à une telle unité fonctionnelle permet d'atteindre les objectifs et le champ de l'étude.
2.C.2.ii - Les flux de référence pour chaque scénario sont clairement établis et en accord avec la définition de l'unité fonctionnelle	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le Tableau 2-1 présente les flux de référence pour les systèmes à l'étude.
2.C.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME		
2.C.3 - Les frontières du système doivent être clairement définies	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La section 2.5 présente les frontières des systèmes.
2.C.3.i - Les omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de données sont clairement discutées	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le tableau 2-2 présente les processus et sous-processus inclus et exclus pour les systèmes considérés.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.C.3.ii - Les intrants et extrants énergétiques et matériels sont définis et quantifiés	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe C présente l'ensemble des processus considérés dans l'étude ainsi que les quantités pour chacun d'eux.
2.C.3.iii - Les hypothèses sur la production d'énergie sont présentées et adéquates par rapport aux frontières du système de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La section 2.6 en page 20 explique comment les mélanges énergétiques sont pris en considération selon qu'il s'agit de processus d'avant-plan ou d'arrière-plan.
2.C.4 CRITÈRES D'ALLOCATION		
2.C.4 - Les critères d'allocation (massique, énergétique et environnemental) et les hypothèses pour l'introduction initiale des intrants et des extrants sont définies	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le recyclage des métaux est exclu de l'étude car il est considéré faire partie d'un autre système.
2.C.4.i - L'effet de la sélection des critères d'allocation sur les résultats est discuté	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Cette règle du cut-off n'est pas reprise dans la discussion des résultats, mais les résultats obtenus ne justifient pas une telle discussion. Il n'y a pas de manque dans ce cas par rapport à la norme.
2.D.1 MÉTHODOLOGIE DU CYCLE DE VIE		
2.D.1 - La méthodologie utilisée pour la collecte de données est expliquée	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La section 2.6 détaille la collecte de données et l'emploi de la base de données existant dans le cadre de cette étude
2.D.2 - Une description qualitative et quantitative des processus élémentaires est faite	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Dans l'ensemble du chapitre 2 et de l'annexe C, les processus sont présentés.
2.D.3 - Les sources de la documentation consultée sont données	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les références sont données.

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.D.4- Le mode de calcul de l'inventaire est présenté		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Page 23 : Les auteurs ont employés le logiciel SimaPro 7.2.	
2.D.5- La qualité des données utilisées est évaluée		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	La qualité des données est évaluée de manière qualitative à l'annexe D selon les critères de fiabilité et de représentativité définis à la section 2.8.2.	
2.D.6- Une explication est fournie sur la manière dont les données manquantes sont traitées		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable		
2.D.7- Une analyse de sensibilité est faite afin de raffiner les frontières du système		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Différentes analyses de sensibilité ont été faites, notamment sur la durée de vie des systèmes thermosolaire.	
2.D.8- Les règles d'allocation sont documentées et justifiées		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Le recyclage des métaux est exclu par la règle du cut-off. Il s'agit d'une approche classique.	
2.D.9- Les règles d'allocation sont appliquées de manière uniforme		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Cette règle semble être appliquée de manière uniforme.	
2.E ÉVALUATION DES IMPACTS DU CYCLE DE VIE		
2.E.1- Les modes opératoires, les calculs et les résultats de l'évaluation du cycle de vie sont présentés		
<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Les calculs pour l'ÉICV ont été faits à l'aide du logiciel SimaPro 7.3 et de la méthode d'évaluation d'impacts impact 2002+. L'annexe E présente l'ensemble des résultats de l'ÉICV. Les auteurs mentionnent à la fois SimaPro 7.2 et SimaPro 7.3. Un ajustement est requis.	

2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION		
2.E.2- Les résultats de l'ÉICV respectent les objectifs et le champ de l'étude		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable		
2.E.3- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les objectifs et le champ de l'étude est discutée		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	Des conclusions intermédiaires sont faites suite aux différentes analyses pour faire le lien avec les objectifs de l'étude.	
2.E.4- La relation entre les résultats de l'ÉICV et les résultats de l'inventaire est discutée		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable		
2.E.5- Les catégories d'impacts et les catégories d'indicateurs sont définies, justifiées et référencées		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 24 et 25.	
2.E.6- Une description de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisées, y compris toutes les hypothèses et les limites, est donnée		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 24 et 25.	
2.E.7- Une description de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et ailleurs dans l'ÉICV est faite de même qu'une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations		
<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable	L'annexe B présente la méthodologie d'évaluation des impacts. Une référence est également donnée et une discussion sur les différents indicateurs est présentée en pages 24 et 25. Aucune normalisation n'a été faite.	



<b>2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION</b>	
2.E- Une indication est faite que les résultats de l'ÉCV soient des expressions relatives et qu'ils ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Page 66 : Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans le contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible. Page 67: Les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.	
<b>2.F INTERPRÉTATION DU CYCLE DE VIE</b>	
2.F.1- Les résultats sont clairement présentés et interprétés	<input type="checkbox"/> Exigence respectée <input checked="" type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Les processus contributeurs ne sont pas clairement identifiés lorsque les profils environnementaux sont présentés. On parle plutôt de grandes catégories d'activités qui peuvent englober plusieurs processus. Davantage de détails sur les processus impliqués permettrait une meilleure utilisation de l'étude selon les objectifs de cette dernière.	
2.F.2- Les hypothèses et les limites associées à l'interprétation des résultats sont présentées en relation avec la méthodologie et les données	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Les limitations de l'étude sont présentées.	
2.F.3- Les résultats sont interprétés en fonction d'une évaluation de la qualité des données	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
2.F.4- L'interprétation fait état d'une transparence totale en termes de choix de valeurs, de justifications et d'appréciations d'experts	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
<b>2.G REVUE CRITIQUE</b>	
2.G.1- Les noms et les affiliations des réviseurs sont clairement identifiés	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable

<b>2- EXIGENCES SPÉCIFIQUES POUR LES ÉTUDES AVEC DIVULGATION</b>	
2.G.2- Let(s) rapport(s) du comité de revue critique est (sont) annexé(s) au rapport de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
2.G.3- Les réponses des auteurs aux commentaires du comité de revue critique sont annexés au rapport de l'étude	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
<b>3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC</b>	
3.A- Une analyse des flux de matière et d'énergie est faite afin d'en justifier leurs inclusions ou exclusions	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Une telle analyse n'a pas été faite, mais il n'y a pas suffisamment de flux exclus pour que ceci nuise au respect de l'exigence de la norme.	
3.B - Une évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées est faite	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Les auteurs en page 27 mentionnent qu'il y a eu analyses de cohérence et de complétude tout au long de l'étude.	
3.C - Une description de l'équivalence des systèmes comparés est faite	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Les sections 2.2 et 2.3 définissent les systèmes et leur équivalence entre eux en termes de fonction et de quantité pour répondre à l'unité fonctionnelle.	
3.D - Le processus de revue critique est décrit	<input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée <input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée <input type="checkbox"/> Exigence non respectée <input type="checkbox"/> Exigence non applicable
Le processus est décrit en page 28.	
3.E - Une évaluation de la complétude de l'ÉCV est faite	

3- EXIGENCES ADDITIONNELLES EN MATIÈRE DE COMMUNICATION DANS LE CAS D'UNE AFFIRMATION COMPARATIVE DESTINÉE À ÊTRE DIVULGUÉE AU PUBLIC		
<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div>	Les auteurs en page 25 mentionnent qu'il y a eu analyse de complétude tout au long de l'étude.	
3.F- Une mention est faite de l'acceptation internationale des indicateurs de catégorie utilisée, de même qu'une justification de leur utilisation	Une telle mention est faite en page 21.	
<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div>		
3.G- Une explication est donnée quant à la validité scientifique et technique de même que la pertinence environnementale des indicateurs de catégories utilisés	Les auteurs font référence à un article scientifique présentant la méthode d'impacts Impact 2002+.	
<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div>		
3.H- Les résultats d'une analyse d'incertitude et d'une analyse de sensibilité sont présentés	Les résultats de ces analyses sont présentés à l'annexe E et discutés dans le rapport.	
<div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div>		
3.I- Si des différences sont trouvées par rapport aux résultats de d'autres études similaires, une évaluation de la signification de ces différences est faite	Aucune mention n'est faite par rapport à des études similaires. Les auteurs devraient, en l'absence de telles études, mentionner qu'il s'agit d'une première étude et qu'il n'est pas possible de faire de parallèle avec d'autres résultats.	
<div><input type="checkbox"/> Exigence respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence partiellement respectée</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Exigence non respectée</div> <div><input type="checkbox"/> Exigence non applicable</div>		