



# 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

Jun 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



**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/>

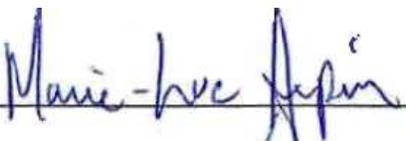
## Équipe de travail

---

### 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.

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

Présidence du comité de révision

Reda Djebbar, ing. Ph.D.

CanmetÉnergie – Ressources naturelles Canada

Révision

Philippe Pasquier, ing., Ph.D.

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

Révision



## 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 CIRAIQ, 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+** (Jolliet *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** :

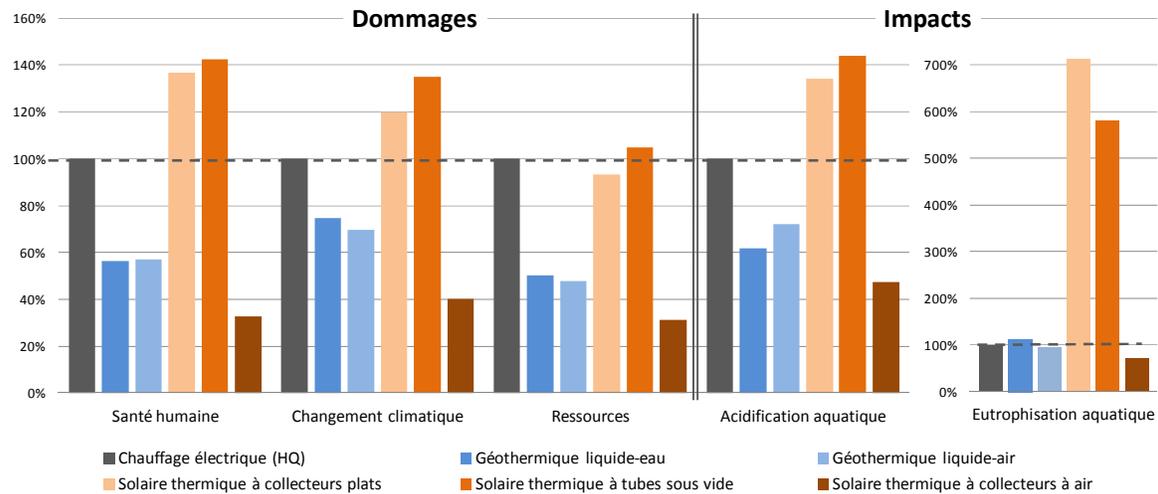
- L'**étape de production** domine le profil de cinq des six indicateurs considérés, à cause de la fabrication des capteurs solaires et du système de ventilation ;
- L'**étape d'utilisation** contribue à une part significative des impacts potentiels dans cinq catégories, et elle domine le profil d'impacts 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**

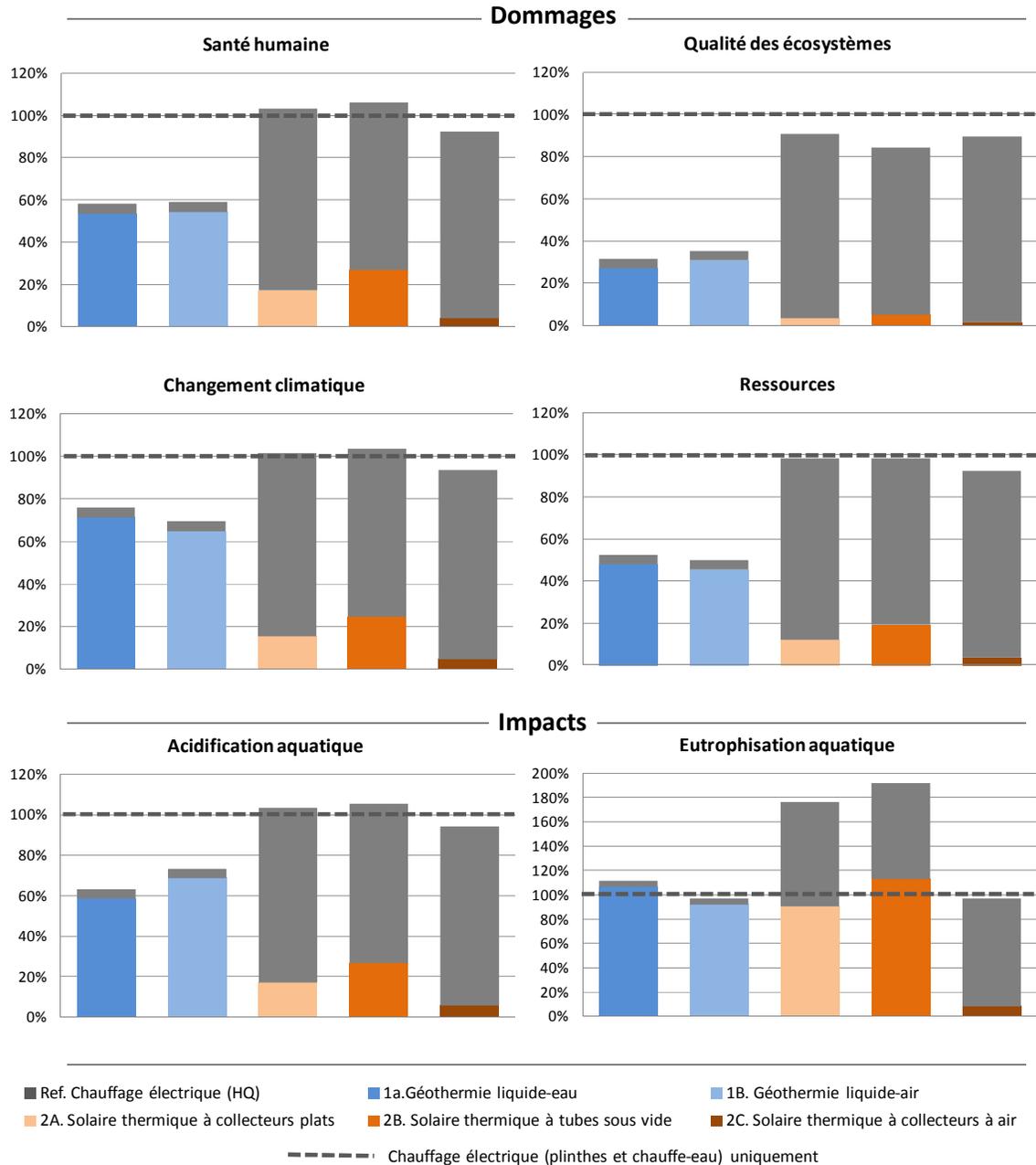
Les systèmes de production décentralisée d'énergie thermique comparés permettent tous de chauffer de l'air et de l'eau sanitaire. Par contre, du fait de leurs capacités de production bien différentes, chacune des technologies peut combler une part plus ou moins importante de la demande annuelle totale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