

Analyse de cycle de vie
d'une installation géothermique à échangeur vertical
d'un bâtiment commercial situé à Montréal

par

Rania ESCHEIKH

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 23 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Rania Escheikh, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Lamarche, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Didier Haillot, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 AVRIL 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce travail marque l'aboutissement d'un parcours enrichissant, rempli de défis et d'apprentissages. Il n'aurait pas été possible sans le soutien, l'encadrement et l'encouragement de plusieurs personnes, à qui j'exprime toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à témoigner ma profonde reconnaissance envers mon encadrant, M. Louis Lamarche, pour m'avoir offert l'opportunité d'entreprendre cette maîtrise à l'École de Technologie Supérieure. Son expertise et ses conseils avisés ont été essentiels à la réussite de ce mémoire.

Je souhaite également adresser mes plus sincères remerciements à ma famille, qui a toujours été ma plus grande source de force et d'inspiration, même si loin de moi, elle reste près de mon cœur. À mon père, Hatem Abdallah Escheikh, dont la sagesse, le dévouement et les valeurs qu'il m'a transmises ont été des piliers dans mon parcours. À ma mère, Maha Laribi Escheikh, dont l'amour inconditionnel, les encouragements et la bienveillance m'ont porté dans les moments les plus difficiles. À ma sœur, Cyrine Escheikh, dont la présence et le soutien ont toujours été une source de réconfort et de motivation. Et à mon frère, Mohammed Walid Escheikh, dont l'énergie et la complicité m'ont apporté un équilibre précieux tout au long de cette aventure. Son optimisme et sa capacité à me faire rire même dans les périodes les plus intenses ont été une véritable bouffée d'air frais. Vous avez été à mes côtés à chaque étape, me rappelant l'importance de la persévérance et du courage, et je vous en suis infiniment reconnaissante.

Enfin, une mention spéciale à mon meilleur ami et fiancé, Louis Lacroix, pour son soutien inébranlable. Ses encouragements et sa présence bienveillante m'ont donné la force de relever chaque défi et d'aller toujours plus loin.

Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir accompagnée dans cette aventure avec tant de générosité et de compréhension...

Analyse de cycle de vie d'une installation géothermique à échangeur vertical d'un bâtiment commercial situé à Montréal

Rania ESCHEIKH

RÉSUMÉ

Les pompes à chaleurs géothermiques (PACG) présentent généralement des avantages environnementaux significatifs par rapport aux systèmes de chauffage traditionnels. Contrairement aux chaudières à gaz ou à fioul, elles ne produisent aucune émission directe de gaz à effet de serre et éliminent la dépendance aux combustibles fossiles. À la différence des plinthes électriques qui nécessitent une importante quantité d'énergie pour générer directement de la chaleur, celles-ci puisent dans l'énergie renouvelable du sol. Elles sont capables de fournir trois à cinq fois plus d'énergie thermique que l'énergie qu'elles absorbent. Comparées aux thermopompes à air, les thermopompes géothermiques sont plus performantes. En exploitant la température stable du sol, elles assurent un rendement constant. Dans un contexte où l'origine de l'électricité influence les répercussions écologiques des équipements de chauffage, l'intégration des installations géothermiques soulève pourtant la question quant à leur pertinence environnementale. Bien que très efficaces et moins énergivores que les systèmes conventionnels, cette réflexion s'impose dans des régions comme le Québec, où l'électricité provient principalement de sources renouvelables notamment l'hydroélectricité.

C'est dans ce cadre que le présent mémoire vise à analyser le cycle de vie d'une PACG dans un bâtiment commercial situé à Montréal. L'évaluation de l'empreinte environnementale repose sur une approche conforme aux normes ISO 14040/44 à l'aide du logiciel SimaPro 9.6. Les frontières du système incluent la production, l'installation, l'exploitation annuelle et la fin de vie de la PACG. Le bilan d'inventaire provient de la base de données Ecoinvent 3.10 et est adapté au contexte Québécois. Deux méthodes, TRACI 2.1 et ReCiPe 2016, sont utilisées permettant une analyse aux niveaux *Midpoint* et *Endpoint*. Les résultats montrent que la phase de production et d'installation des systèmes géothermiques est le principal contributeur à la majorité des catégories d'impacts (CI), notamment à l'appauvrissement en couche d'ozone (97,28%) et l'épuisement des combustibles fossiles (94,88%). L'exploitation annuelle représente une part importante de l'écotoxicité (27,28%), tandis que la phase de fin de vie a un impact notable sur les émissions de substances cancérigènes (24,65%).

Mots-clés : ISO 14040/44, Technosphère et biosphère, Puits géothermique, TRACI 2.1, Mix électrique, Ecoinvent 3.10

Life cycle assessment of a vertical heat exchanger geothermal installation in a commercial building located in Montreal

Rania ESCHEIKH

ABSTRACT

Geothermal Heat Pumps (GHPs) generally offer significant environmental advantages over traditional heating systems. Unlike gas or oil boilers, they produce no direct greenhouse gas emissions and eliminate dependence on fossil fuels. In contrast to electric baseboard heaters, which require a large amount of energy to generate heat directly, GHPs harness renewable energy from the ground. They can deliver three to five times more thermal energy than the electricity they consume. Compared to air-source heat pumps, geothermal heat pumps are more efficient. By exploiting the stable ground temperature, they ensure consistent performance. However, in a context where the electricity mix influences the environmental impact of heating systems, integrating geothermal installations raises questions about their actual environmental relevance. While highly efficient and less energy-intensive than conventional systems, this consideration is particularly relevant in regions such as Quebec, where electricity is primarily generated from renewable sources, notably hydropower.

This thesis aims to analyze the life cycle of a GHP in a commercial building located in Montreal. The environmental footprint assessment follows the ISO 14040/44 standards using the SimaPro 9.6 software. The system boundaries include production, installation, annual operation, and end-of-life phases of the GHP. The life cycle inventory is sourced from the Ecoinvent 3.10 database and adapted to the Quebec context. Two methods, TRACI 2.1 and ReCiPe 2016, are employed to conduct both Midpoint and Endpoint analyses. The results indicate that the production and installation phases of geothermal systems contribute the most to the majority of impact categories (IC), particularly ozone layer depletion (97.28%) and fossil fuel depletion (94.88%). The annual operation phase accounts for a significant portion of ecotoxicity (27.28%), while the end-of-life phase has a notable impact on carcinogenic emissions (24.65%).

Keywords : ISO 14040/44, Technosphere and biosphere, Geothermal well, TRACI 2.1, Electricity mix, Ecoinvent 3.10

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE..... | 5 |
| 1.1 Description des quatre phases de l'ACV | 5 |
| 1.1.1 Définition des objectifs et du champ d'application | 6 |
| 1.1.2 Analyse de l'inventaire | 8 |
| 1.1.3 Évaluation des impacts | 8 |
| 1.1.4 Interprétation des résultats | 8 |
| 1.2 Principes de modélisation d'un système | 9 |
| 1.3 Cadre normatif | 11 |
| 1.4 Structure des méthodes | 11 |
| 1.5 Application de l'ACV pour les pompes à chaleur dans les recherches antérieures..... | 16 |
| 1.5.1 Identification des éléments des recherches antérieures | 16 |
| 1.5.2 Disparités entre les études..... | 17 |
| 1.5.2.1 Réfrigérants..... | 17 |
| 1.5.2.2 COP..... | 18 |
| 1.5.2.3 Unité Fonctionnelle..... | 18 |
| 1.5.2.4 Méthode de l'analyse | 18 |
| 1.5.3 Évaluation des IE | 20 |
| CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE..... | 23 |
| 2.1 Modélisation énergétique des charges du bâtiment | 23 |
| 2.1.1 Conception architecturale et modélisation 3D sur SketchUp | 24 |
| 2.1.2 Simulation des charges thermiques avec OpenStudio et EnergyPlus | 25 |
| 2.2 Dimensionnement du système géothermique sur Python | 27 |
| 2.2.1 Sélection des thermopompes..... | 28 |
| 2.2.2 Charges au sol | 28 |
| 2.2.3 Longueurs des puits | 30 |
| 2.2.4 Pertes de charges | 32 |
| 2.2.5 Consommation électrique | 33 |
| 2.3 ACV de la PACG sur SimaPro 9.6 | 34 |
| 2.3.1 Définition des objectifs et du champ d'application | 34 |
| 2.3.2 Données d'inventaire | 35 |
| 2.3.3 Approche d'évaluation des IE avec un scénario alternatif..... | 41 |
| CHAPITRE 3 RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION | 49 |
| 3.1 Étude des IE avec TRACI 2.1 <i>Midpoint</i> | 49 |
| 3.1.1 Contribution des processus | 49 |
| 3.1.2 Normalisation..... | 50 |
| 3.1.3 Diagrammes de Sankey..... | 54 |

| | | |
|--|---|-----|
| 3.2 | Contrôle de qualité..... | 56 |
| 3.2.1 | Évaluation des impacts avec les méthodes TRACI 2.1 et ReCiPe 2016 Midpoint..... | 56 |
| 3.2.2 | Comparaison des résultats d’inventaire avec les recherches antérieures.. | 59 |
| 3.3 | Analyse d’incertitude..... | 62 |
| 3.3.1 | Données d’inventaire | 62 |
| 3.3.2 | Étude de sensibilité avec comparaison d’une PACA..... | 64 |
| 3.3.2.1 | Cas au Québec..... | 65 |
| 3.3.2.2 | Cas en Alberta..... | 69 |
| 3.4 | Discussion..... | 73 |
| CONCLUSION..... | | 77 |
| RECOMMANDATIONS | | 79 |
| ANNEXE I | ZONE CLIMATIQUE ASHRAE 90.1-2010 DE MONTRÉAL | 81 |
| ANNEXE II | PROGRAMME PYTHON POUR LA CONCEPTION DE L’INSTALLATION GÉOTHERMIQUE..... | 83 |
| ANNEXE III | DONNÉES DE PERFORMANCE – TS H/V/D 060 | 93 |
| ANNEXE IV | DIAMÈTRE DE CONDUITE RECOMMANDÉ EN FONCTION DU DÉBIT MAXIMAL | 95 |
| ANNEXE V | FACTEURS DE CORRECTION DE LA CAPACITÉ POUR L'ANTIGEL | 97 |
| ANNEXE VI | LONGUEURS ÉQUIVALENTES ET COEFFICIENTS DE DÉBITS DES VANNES EN FONCTION DU DIAMÈTRE NOMINAL | 99 |
| ANNEXE VII | COURBE CARACTÉRISTIQUE DES POMPES - NPSH 5SV | 101 |
| ANNEXE VIII | DONNÉES DE PERFORMANCE - POMPE À CHALEUR RÉVERSIBLE INVERTER - GAMME ACTIVE SERIES GAINABLE STANDARD FBA-A(9) - R32 | 103 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | | 105 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--|------|
| Tableau 2.1 Propriétés thermiques des éléments extérieurs de l’enveloppe..... | 26 |
| Tableau 2.2 Valeurs des charges au sol mensuelles | 29 |
| Tableau 2.3 Pertes de charge de l’installation géothermique | 33 |
| Tableau 2.4 Données d’inventaire du système géothermique pour l’ACV de la phase de production et d’installation de l’échangeur de chaleur | 37 |
| Tableau 2.5 Données d’inventaire du système géothermique pour l’ACV de la phase de production et d’installation de la pompe à chaleur..... | 39 |
| Tableau 2.6 Données d’inventaire du système géothermique pour l’ACV de la phase d’exploitation annuelle..... | 39 |
| Tableau 2.7 Données d’inventaire du système géothermique pour l’ACV de la phase de fin de vie..... | 40 |
| Tableau 2.8 Classification des catégories de dommage dans ReCiPe 2016..... | 43 |
| Tableau 2.9 Classification des CI dans ReCiPe 2016 et TRACI 2.1 | 44 |
| Tableau 2.10 Données d’inventaire pour l’ACV de la phase de production et d’installation de la PACA | 46 |
| Tableau 2.11 Données d’inventaire pour l’ACV de la phase d’exploitation annuelle de la PACA | 47 |
| Tableau 2.12 Données d’inventaire pour l’ACV de la phase de fin de vie de la PACA..... | 47 |
| Tableau 3.1 Contribution des phases de vie du système géothermique pour différentes CI | 51 |
| Tableau 3.4 Comparaison des résultats de CI entre ReCipe 2016 et TRACI 2.1 | 57 |
| Tableau 3.5 Comparaison des résultats de CI entre l’installation géothermique et la pompe à chaleur air-air au Québec..... | 66 |
| Tableau 3.6 Comparaison des résultats de CI de la phase de production et installation entre la PACG et la PACA au Québec..... | 68 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Tableau 3.7 | Comparaison des résultats de CI entre la PACG et la pompe à chaleur air-air en Alberta..... | 71 |
|-------------|--|----|

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|--|------|
| Figure 0.1 Chauffage résidentiel selon la technologie, scénario carboneutralité à l'échelle mondiale | 1 |
| Figure 1.1 Phases de l'ACV | 6 |
| Figure 1.2 Interactions entre la biosphère et la technosphère | 9 |
| Figure 1.3 Modélisation des processus unitaires..... | 10 |
| Figure 1.4 Structure de la méthode ReCiPe 2016 | 15 |
| Figure 1.5 Classification des articles selon le type de pompe à chaleur | 17 |
| Figure 2.1 Vue de la représentation 3D de local commercial sur SketchUp..... | 24 |
| Figure 2.2 Horaires de fonctionnement..... | 26 |
| Figure 2.3 Profils de charges mensuels en chauffage et climatisation..... | 27 |
| Figure 2.4 Configuration centrale du système géothermique de la zone | 30 |
| Figure 2.5 Conception du champ géothermique centralisé | 31 |
| Figure 2.6 Frontières du système géothermique pour l'ACV | 35 |
| Figure 3.1 Normalisation des CI | 52 |
| Figure 3.2 Normalisation des CI par phase | 53 |
| Figure 3.3 Diagramme de Sankey de la phase de production et installation pour les substances cancérigènes | 55 |
| Figure 3.4 Diagramme de Sankey de la phase d'exploitation annuelle pour l'écotoxicité | 56 |
| Figure 3.5 Contribution de substances à l'eutrophisation (kg N eq) | 58 |
| Figure 3.6 Évaluation comparative par la méthode ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> avec (Smith et al., 2021)..... | 60 |
| Figure 3.7 Évaluation comparative par la méthode ReCiPe 2016 <i>Endpoint</i> avec (Smith et al., 2021)..... | 61 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.8 | Évaluation comparative des résultats de données d’inventaire pour la PACG entre (Violante et al., 2022) et (Smith et al., 2021)..... | 63 |
| Figure 3.9 | Évaluation comparative des IE avec la pompe à chaleur air-air au Québec .. | 65 |
| Figure 3.10 | Contribution des phases de cycle de vie sur les CI au Québec | 67 |
| Figure 3.11 | Contribution de la phase de production et installation de la PACG sur les CI au Québec | 69 |
| Figure 3.12 | Évaluation comparative des IE avec la pompe à chaleur air-air en Alberta | 70 |
| Figure 3.13 | Évaluation comparative des IE de l’installation géothermique entre le Québec et l’Alberta | 72 |
| Figure 3.14 | Contribution des phases de cycle de vie sur les CI en Alberta | 73 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|--------|---|
| ACV | Analyse de cycle de vie |
| AHRI | Air-conditioning, heating, and refrigeration institute |
| ASHRAE | American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers |
| BES | Building energy simulation |
| BIM | Building information modeling |
| CI | Catégorie d'impact |
| COV | Composés organiques volatils |
| COP | Coefficient de performance |
| CSA | Canadian standards association |
| DALY | Disability adjusted loss of life years |
| DOE | Department of energy |
| ED | Extinction delay |
| EPA | Environmental protection agency |
| HH | Human health |
| IE | Impact environnemental |
| ISO | International organization for standardization |
| PAC | Pompe à chaleur |
| PACA | Pompe à chaleur à source d'air |
| PACG | Pompe à chaleur géothermique |
| PCB | Biphényles polychlorés |
| PEHD | Polyéthylène haute densité |
| PVC | Polychlorure de vinyle |
| RBQ | Régie du bâtiment du Québec |
| RS | Resource scarcity |
| SDR | Standard Dimension Ratio |
| SETAC | Society of environmental toxicology and chemistry |
| WBCSD | World business council for sustainable development |
| WRI | World resources institute |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

| | | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| L | Longueur des puits | m |
| SCT | Superposition des charges temporelles | m.K |
| q_b | Charge thermique du puits | W |
| t_f | Température moyenne du fluide | K |
| R_b | Résistance thermique du puits | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| T_0 | Température du sol | K |
| T_{fi} | Température d'entrée du fluide | K |
| T_{fo} | Température de sortie du fluide | K |
| k_s | Conductivité thermique du sol | $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ |
| i | Compteur de mois | |
| mois_ini | Mois initial | |
| N_p | Nombre de mois considérés | mois |
| N_p-1 | Dernier mois considéré | |
| $q_{m,i}$ | Charge thermique pour le mois i | W |
| $q_{m,i-1}$ | Charge thermique pour le mois précédent (i-1) | W |
| g | g-fonction de Eskilson | |
| \bar{t}_f | Température moyenne du fluide | K |
| \bar{t}_i | Temps correspondant au mois i | hr |
| \bar{r}_b | Résistance thermique moyenne du puits | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| q_{hr} | Charge thermique horaire | W |
| $q_{m,np-1}$ | Charge thermique du dernier mois (N_p-1) | W |
| $\overline{\text{bloc_horaire}}$ | Période spécifique moyenne d'évaluation | hr |
| R_c | Résistance thermique du coulis | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| R_p | Résistance thermique totale de la conduite | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| R_{conv} | Résistance thermique de convection de la conduite | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |
| R_{cond} | Résistance thermique de conduction de la conduite | $m \cdot K \cdot W^{-1}$ |

| | | |
|-----------------------|--|-------------------------------|
| r_{pi} | Rayon interne de la conduite | m |
| h_{conv} | Coefficient de transfert convectif | $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ |
| r_{po} | Rayon externe de la conduite | m |
| k_p | Conductivité thermique de la conduite | $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ |
| k_c | Conductivité thermique du coulis | $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ |
| r_b | Rayon du puits | m |
| x_c | Moitié de la distance (centre-à-centre) | m |
| $h_{pertes_charges}$ | Pertes de charges totales | m |
| f | Coefficient de friction | |
| L | Longueur de la conduite | m |
| D | Diamètre de la conduite | m |
| u | Vitesse moyenne du fluide | m/s |
| g | Accélération gravitationnelle | m/s^2 |
| k | Facteur de perte singulière | |
| S_g | Gravité spécifique | |
| \dot{V} | Débit volumique | m^3/s |
| C_v | Coefficient de débit des vannes | $m^3/s/(k.Pa)^{1/2}$ |
| W_{pompe} | Puissance mécanique fournie à la pompe | W |
| \dot{m}_{pompe} | Débit massique circulant dans la pompe | kg/s |
| $P_{elec,pompe}$ | Énergie électrique consommée par la pompe | k.W.h |
| t_{op} | Temps d'opération total | hr |
| W_{ch} | Énergie thermique nécessaire pour le chauffage | k.W.h |
| q_{ch} | Quantité de chaleur pour le chauffage | k.W.h |
| COP_{ch} | Coefficient de performance pour le chauffage | |
| W_{cl} | Énergie thermique nécessaire pour la climatisation | k.W.h |
| q_{cl} | Quantité de chaleur pour la climatisation | k.W.h |
| COP_{cl} | Coefficient de performance pour la climatisation | |
| I | Impact potentiel total | |

| | | |
|-----|--|----|
| CFm | Facteur de caractérisation | |
| M | Masse du produit chimique | kg |
| i | Catégorie d'impact spécifique | |
| x | Produit chimique | |
| m | Milieu | |
| y | Substance de référence | |
| CFe | Facteurs de caractérisation d'impact final | |
| F | Facteur de conversion constant | |
| M | Point intermédiaire | |
| E | Point final | |
| c | Perspective culturelle | |
| a | Zone de protection | |

Lettres grecques

| | | |
|----------------|---|-------------------|
| σ | Rapport entre la différence et la somme des conductivités thermiques du coulis et du sol | |
| ρ | Densité du fluide | kg/m ³ |
| η_{pompe} | Rendement de la pompe | |

Indices

| | |
|----------------|-------------------|
| b | Puits |
| f | Fluide |
| m | Mois |
| hr | Horaire |
| c | Coulis |
| p | Conduite |
| conv | Convection |
| cond | Conduction |
| pompe | Pompe |
| pertes_charges | Pertes de charges |

| | |
|------|------------|
| v | Valves |
| élec | Électrique |
| op | Opération |

INTRODUCTION

Dans le scénario de carboneutralité au Canada pour le secteur résidentiel et commercial, les thermopompes répondront à environ la moitié des besoins en chauffage des bâtiments d'ici 2050 (Voir Figure 0.1). Selon la Régie de l'énergie du Canada, ces systèmes qui utilisent principalement l'air extérieur et le sol comme sources d'énergies, remplaceront progressivement les appareils de chauffage au gaz naturel ainsi que les plinthes électriques. Par ailleurs, avec un coût d'acquisition et de mise en place inférieur à celui des modèles géothermiques, les modèles à air constituent la majorité des installations actuelles et futures à travers le Canada, quels que soient les scénarios envisagés.

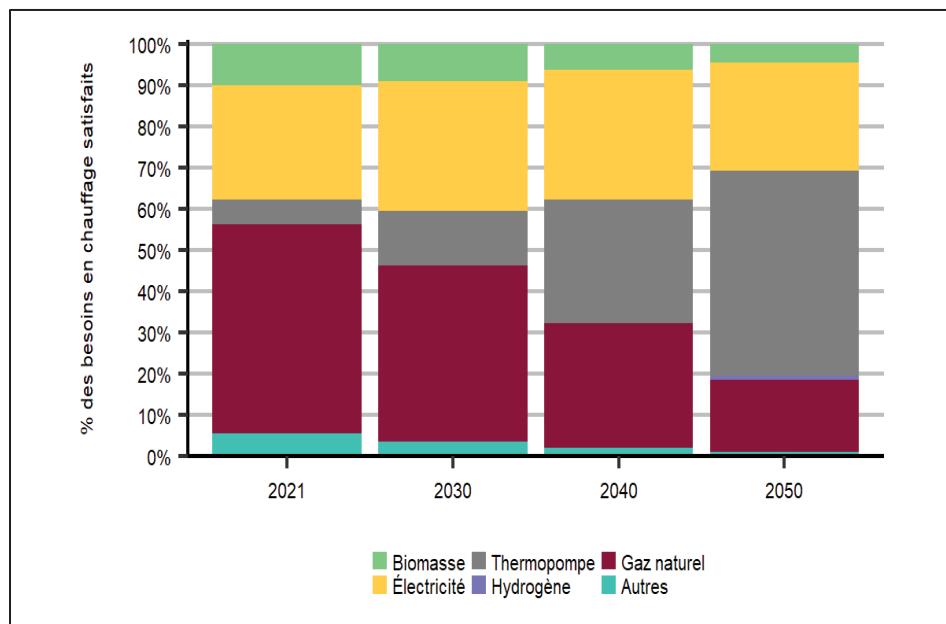


Figure 0.1 Chauffage résidentiel selon la technologie, scénario carboneutralité à l'échelle mondiale
Tirée de REC (2023)¹

¹[REC – Avenir énergétique du Canada en 2023 : Résultats](#)

Cependant, les PACG sont reconnues comme une technologie pertinente dans la transition énergétique. Grâce à leur capacité à exploiter la chaleur du sol comme source d'énergie renouvelable et constante, ils offrent une alternative efficace et durable aux systèmes de chauffage conventionnels. Par rapport aux pompes à chaleur à source d'air (PACA), ces types d'équipements se distinguent par un rendement énergétique plus stable, même dans des conditions climatiques rigoureuses. Ils se caractérisent également par une durée de vie généralement plus longue, en raison de l'absence d'exposition directe aux variations météorologiques.

Bien que l'exploitation annuelle des thermopompes géothermiques consomme généralement moins d'électricité que celle à source d'air, il est essentiel de prendre en compte les effets écologiques de toutes les phases de leur cycle de vie; De la production jusqu'à la fin de leur vie utile, en passant par l'implantation et l'utilisation. Cette approche permet de mieux évaluer leur durabilité de manière globale. En effet, certains impacts environnementaux (IE) significatifs, tels que ceux liés à l'extraction des matériaux ou à la gestion en fin de vie, pourraient contrebalancer leurs avantages opérationnels.

L'analyse de cycle de vie (ACV) appliquée aux systèmes géothermiques a émergé dans les années 1990, en parallèle avec la montée des préoccupations environnementales et l'adoption croissante de cette technologie. Dans ce cadre, plusieurs recherches ont été réalisées au cours des dix dernières années. Celles-ci ayant pour but d'analyser l'efficacité, mais surtout les retombées environnementales, des installations géothermiques par rapport à d'autres systèmes. Toutefois, très peu d'études ont été menées dans la région de Québec.

Cette étude vise à évaluer les performances écologiques d'une PACG verticale pour un bâtiment commercial à l'aide d'une ACV. Tout en intégrant les spécificités régionales tel que le mix électrique Québécois, elle compare ses effets environnementaux à ceux d'une PACA et identifie les principaux facteurs déterminants.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux afin de mesurer l'empreinte environnementale des systèmes géothermiques. Le premier chapitre présente le cadre théorique de l'étude, en détaillant les phases de l'ACV et ses principes fondamentaux, tout en établissant le contexte normatif. Il inclut également une revue des recherches antérieures, mettant en évidence les disparités procédurales et les principaux résultats concernant l'IE des installations géothermiques. À l'aide d'outils spécialisés, le deuxième chapitre décrit la méthodologie adoptée, comprenant la modélisation énergétique des charges du bâtiment, le dimensionnement et l'approche d'évaluation complète des effets écologiques. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats obtenus, leur interprétation et une discussion approfondie. Il explore les contributions des différents processus, évalue la qualité des résultats et analyse les incertitudes liées à plusieurs scénarios.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente les principales étapes de l'ACV selon les normes ISO, en commençant par la définition des objectifs et du champ d'application, qui fixe les paramètres de l'étude. L'analyse de l'inventaire quantifie les flux de matières et d'énergie, tandis que l'évaluation des impacts relie ces flux à des catégories environnementales intermédiaires et finales. Enfin, l'interprétation des résultats identifie les incertitudes et propose des améliorations.

Les principes de modélisation des systèmes sont expliqués, incluant la définition des processus unitaires et des flux entre la biosphère et la technosphère. Le cadre normatif, basé sur les séries ISO 14040-44, est exposé, ainsi que les structures méthodologiques employées, notamment les approches *Midpoint* et *Endpoint*.

L'analyse des recherches antérieures sur les pompes à chaleur identifie les disparités méthodologiques liées aux réfrigérants, coefficients de performance, unités fonctionnelles et méthodes d'évaluation. Enfin, une revue de la littérature sur l'évaluation des IE de ces systèmes présente les résultats des études précédentes et les paramètres influençant leurs performances, en tenant compte du contexte.

1.1 Description des quatre phases de l'ACV

L'ACV est un outil permettant d'évaluer l'IE et de quantifier la performance environnementale des produits en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, depuis la production des matières premières jusqu'à l'élimination finale des produits, y compris le recyclage des matériaux si nécessaire.

Elle permet d'identifier des opportunités d'amélioration en déterminant les points critiques environnementaux dans le cycle de vie d'un produit et facilite l'analyse de la contribution des différentes étapes de ce dernier à la charge environnementale globale ainsi que la comparaison entre divers produits, processus ou systèmes.

(Jolliet, Saadé-Sbeih, Shaked, Jolliet & Crettaz, 2016) indiquent que selon les définitions fournies dans les normes de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) et par la Société de Toxicologie Environnementale et de Chimie (SETAC), une ACV comprend une définition des objectifs et du champ d'application, une analyse de l'inventaire, une évaluation des impacts et une interprétation des résultats (Voir Figure 1.1).

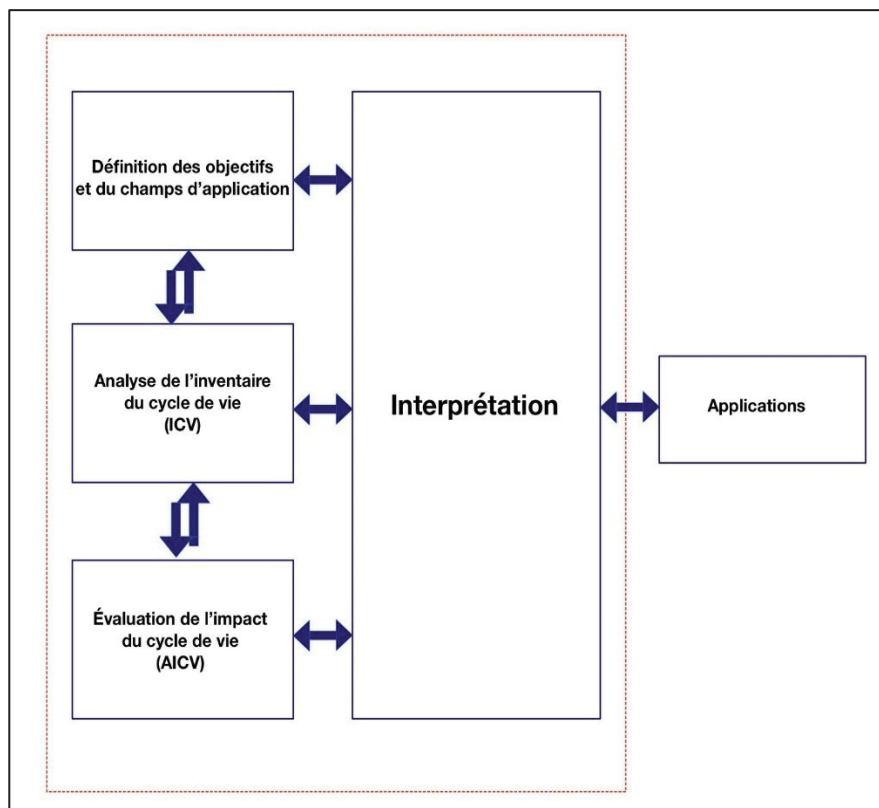


Figure 1.1 Phases de l'ACV
Adaptée de ISO 14040-44 (2006)

1.1.1 Définition des objectifs et du champ d'application

Le problème est décrit tandis que les objectifs et le champ d'application de l'étude sont définis. À cette étape, plusieurs éléments cruciaux sont déterminés :

- La fonction du système :

Une fois que l'objectif d'une étude comparative est défini, différents systèmes ou produits doivent être comparés sur la base d'une fonction commune. Des scénarios, représentant les

différentes alternatives, sont choisis pour satisfaire cette même fonction. Cette fonction du système doit être clairement définie, car elle constitue la base pour déterminer deux éléments essentiels de l'ACV : l'unité fonctionnelle et les frontières du système. Afin de considérer chaque alternative de manière aussi objective que possible, la fonction doit être définie avant de déterminer l'unité fonctionnelle ou les frontières du système.

- L'unité fonctionnelle :

Selon la norme ISO 14044 (2006), l'unité fonctionnelle (UF) est la « performance quantifiée d'un système de produit servant d'unité de référence ». Cette mesure permet de quantifier la fonction d'un système en termes de service rendu. L'UF reste identique pour tous les scénarios, tandis que les flux d'inventaire et les impacts de chaque scénario sont calculés par UF. Par exemple, différents modes de transport sont souvent comparés sur la base d'une UF correspondant au transport d'une personne sur une distance de 1 km (c'est-à-dire 1 personne-kilomètre).

- Les frontières du système :

Les frontières du système déterminent quels modules spécifiques sont inclus ou exclus lors de la modélisation du système. Elles sont définies de manière à idéalement inclure tous les processus nécessaires, du berceau à la tombe, pour accomplir la fonction. Cela peut sembler simple, mais devient rapidement complexe dans les applications concrètes.

Selon la norme ISO 14044, la frontière du système est l'« ensemble de critères spécifiant quels procédés unitaires font partie d'un système de produit ».

- Le scénario de référence et les alternatives :

D'après la norme ISO 14044, dans le cadre d'une ACV comparative, le scénario de référence représente la situation de base ou le système actuellement en place, tandis que les alternatives sont les différentes options envisagées pour remplir la même fonction. Tous les scénarios doivent être évalués selon la même unité fonctionnelle et des frontières de système comparables, afin d'assurer une comparaison cohérente, pertinente et objective.

1.1.2 Analyse de l'inventaire

Les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol sont quantifiées, tout comme les extractions de matières premières renouvelables et non renouvelables. Par ailleurs, les ressources nécessaires pour la fonction du système sont également déterminées.

1.1.3 Évaluation des impacts

Les IE liés aux émissions inventoriées sont évalués. Cela comprend les étapes suivantes (Jolliet et al., 2004) :

- La sélection des CI, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation.
- La classification des émissions contribuant à chaque catégorie d'IE.
- La caractérisation intermédiaire pondère et agrège les émissions dans des CI intermédiaires.
- La caractérisation des dommages agrège les CI en catégories de dommages.
- L'étape supplémentaire de normalisation peut être réalisée pour montrer la contribution du produit étudié en tant que fraction de l'impact global dans une catégorie donnée.
- L'évaluation peut être complétée par une pondération sociale basée sur l'importance relative, ou idéalement les dommages, des impacts intermédiaires.

1.1.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont interprétés, et les incertitudes sont évaluées. Les paramètres clés et les options d'amélioration peuvent être identifiés à l'aide d'études de sensibilité et de propagation des incertitudes. Une analyse critique évalue l'influence des limites et hypothèses choisies. Enfin, les IE peuvent être comparés aux impacts économiques ou sociaux.

1.2 Principes de modélisation d'un système

Le système est défini comme un ensemble d'éléments interagissant dynamiquement, organisé pour accomplir une ou plusieurs fonctions. Il est identifié par les éléments qu'il contient, appelés processus, les liens entre ces éléments, et les limites qui le séparent de son environnement, incluant l'environnement (la biosphère) et le monde économique (la technosphère) (Voir Figure 1.2). Les intrants provenant de l'environnement dans le système sont les ressources extraites et les extrants du système vers l'environnement sont les émissions dans l'air, l'eau et le sol. Par ailleurs, les extrants du système vers le monde économique sont les services fournis par le produit

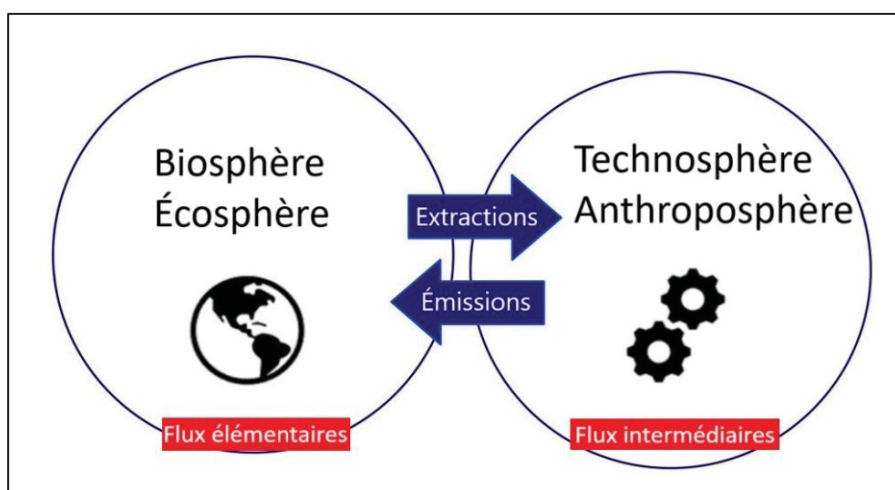


Figure 1.2 Interactions entre la biosphère et la technosphère
Tirée de LIRIDE Lab (2019)²

Le système évalué et modélisé est construit en reliant différents modules de processus. Les processus et éléments nécessaires pour remplir la fonction sont identifiés, et ceux-ci sont exprimés sous forme d'une série de processus unitaires, les plus petits éléments de l'analyse, pour lesquels les intrants et extrants sont quantifiés.

²[Capsule 1 - Premiers pas dans SimaPro](#)

Les processus unitaires sont reliés entre eux au sein du système par des flux intermédiaires, exprimant la quantité de chaque processus unitaire nécessaire pour le processus unitaire suivant. Les flux de produits sortant du système vers l'économie représentent tous les produits quittant le système. Les processus unitaires sont reliés à l'environnement par des flux élémentaires, les flux élémentaires entrants correspondent à l'utilisation de ressources naturelles. Les flux élémentaires sortants d'un processus unitaire sont les émissions dans l'eau, l'air ou le sol (Jolliet et al., 2016) (Voir Figure 1.3).

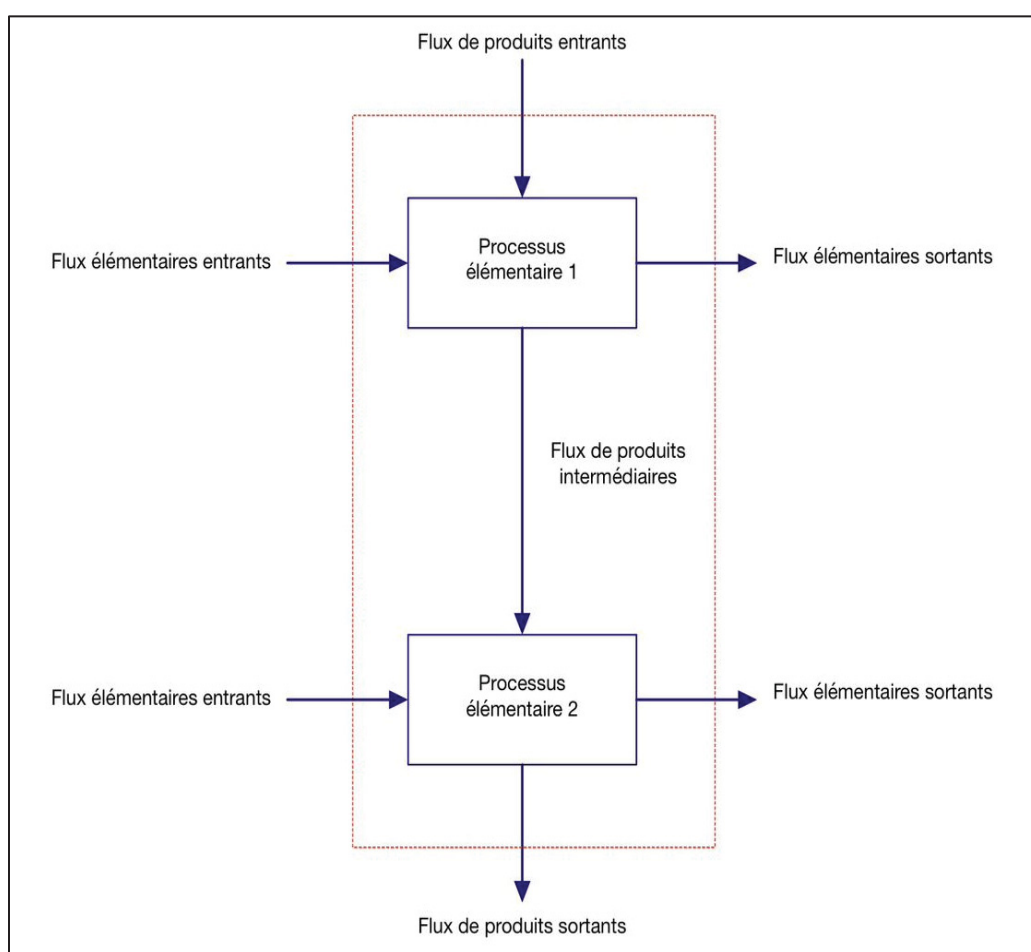


Figure 1.3 Modélisation des processus unitaires
Adaptée de LIRIDE Lab (2019)²

²[Capsule 1 - Premiers pas dans SimaPro](#)

1.3 Cadre normatif

La série ISO 14000 sur les systèmes de gestion environnementale a été révisée pour mettre à jour et fournir un cadre permettant aux entreprises de gérer l'IE de leurs activités et de mesurer leur performance environnementale.

La série ISO 14040 (14040 à 14049) est consacrée à l'ACV. La première norme (ISO 14040) établit les lignes directrices pour réaliser une ACV. En 2006, l'ISO 14044 a remplacé les normes ISO 14041, 14042 et 14043 afin de décrire les phases d'inventaire, d'évaluation des impacts et d'interprétation (Finkbeiner et al., 2006). L'ISO 14046:2014 fournit des lignes directrices pour l'évaluation de l'empreinte hydrique basée sur l'ACV des produits, processus et organisations. Des exemples d'application sont présentés dans les normes ISO 14047 et 14049, tandis que l'ISO 14048 décrit le format de documentation des données (Joliet et al., 2016).

Pour les empreintes carbone, l'ISO et le Protocole des gaz à effet de serre du *World Resources Institute* (WRI) et du *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) fournissent des recommandations plus détaillées (WRI & WBCSD, 2011).

1.4 Structure des méthodes

Les ACV environnementales se concentrent sur les IE, et les substances doivent être comparées en fonction de leur capacité à nuire à l'environnement et à la santé humaine.

Lorsqu'une substance polluante est émise dans un milieu environnemental donné, sa concentration augmente dans ce milieu, et la substance est souvent transférée vers d'autres milieux environnementaux (air, eau ou sol), s'accumule dans la chaîne alimentaire, se transforme en d'autres substances, et est finalement ingérée ou inhalée par les humains ou d'autres espèces. Cela entraîne un impact soit sur la santé humaine, soit sur la qualité de l'environnement.

Le chemin suivi par la substance est appelé voie d'impact (*Impact pathway*), et il englobe tous les processus environnementaux depuis l'émission de la substance jusqu'à son impact final. Les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie modélisent les voies d'impact des

différentes substances afin de relier, avec le plus de précision possible, chaque donnée d'inventaire à son dommage environnemental potentiel basé sur ces voies.

En prenant l'exemple du réchauffement climatique, le chemin d'impact comprend les étapes suivantes : les émissions de gaz à effet de serre génèrent un changement du forçage radiatif (effet de premier ordre), ce qui entraîne une augmentation de la température (effet de deuxième ordre), ce qui a plusieurs conséquences, notamment l'élévation du niveau de la mer due à la fonte des glaces ou l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes (effet de troisième ordre), ce qui finit par causer des dommages aux écosystèmes et aux populations humaines (effet de quatrième ordre).

Pour relier les données d'inventaire aux dommages environnementaux, un cadre méthodologique a été développé dans le cadre de l'initiative sur le cycle de vie (Jolliet et al., 2004).

Tout d'abord, les résultats d'inventaire ayant des effets similaires doivent être regroupés dans une CI intermédiaire, appelée catégorie de point intermédiaire (*Midpoint category*). Pour chaque catégorie de point intermédiaire, un indicateur de point intermédiaire est défini. Chaque flux d'inventaire est multiplié par un facteur de caractérisation pour évaluer sa contribution à cette catégorie intermédiaire. Le terme "point intermédiaire" reflète le fait que ce point se situe quelque part sur la voie d'impact entre les résultats d'inventaire et les dommages.

Le réchauffement climatique, par exemple, est une catégorie intermédiaire représentant l'impact des gaz à effet de serre. Le changement intégré dans le temps du forçage radiatif est généralement pris comme un indicateur intermédiaire, et la contribution de chaque gaz à effet de serre à ce changement de forçage radiatif est caractérisée par un potentiel de réchauffement global, qui sert de facteur de caractérisation, représentant la contribution de chaque émission de gaz à effet de serre par rapport au CO₂. Cependant, d'autres peuvent choisir d'utiliser plutôt l'augmentation de la température comme indicateur intermédiaire.

Chaque catégorie de point intermédiaire est ensuite attribuée à une ou plusieurs catégories de dommages, qui concernent les impacts sur différentes zones de protection, telles que la santé humaine et les écosystèmes. La catégorie de dommages est représentée par un indicateur de dommages, parfois appelé indicateur de point final (*Endpoint indicator*).

Chaque étape de l'évaluation des impacts implique généralement des hypothèses sur la façon de caractériser la contribution aux dommages, ce qui augmente l'incertitude des résultats au fur et à mesure que l'on passe de l'inventaire au point intermédiaire, puis aux résultats de dommages. En revanche, ces étapes de regroupement produisent des résultats plus faciles à interpréter.

Par exemple, un dommage exprimé en années de vie perdues est plus facile à percevoir et à interpréter que la quantité d'un polluant émis (Jolliet et al., 2016).

Les logiciels d'ACV tel que SimaPro, GaBi et OpenLCA intègrent diverses méthodes d'évaluation des IE pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs.

Ces méthodes incluent IMPACT 2002+ qui se distingue par son approche intégrée combinant des évaluations *Midpoint* et *Endpoint*. Pour le réchauffement climatique, l'IPCC est la méthode de référence, mesurant le potentiel de réchauffement global en kg de CO₂ équivalent sur différentes périodes (20, 100, 500 ans). Une alternative plus large est la méthode EF, qui inclut le changement climatique parmi d'autres catégories d'impact.

Pour les évaluations multi-critères, ReCiPe propose une analyse détaillée en distinguant les indicateurs *Midpoint* et *Endpoint* (Voir Figure 1.4), tandis que CML-IA fournit des catégories d'impact spécifiques telles que l'acidification, l'eutrophisation et la toxicité. Eco-Indicator, quant à lui, se concentre sur l'évaluation des dommages environnementaux sous forme de points uniques.

Concernant la toxicité humaine et écotoxicité, USEtox est la référence pour l'analyse des substances chimiques, tandis que TRACI propose une approche adaptée au contexte nord-américain. ILCD, standardisé par la Commission Européenne, offre une alternative plus globale. Pour une évaluation des impacts en termes économiques, la méthode EPS traduit les dommages environnementaux en coûts monétaires.

En matière de consommation d'énergie et d'épuisement des ressources, CED évalue la consommation totale d'énergie primaire (fossile, renouvelable, ...), tandis que ADP se concentre sur l'épuisement des ressources abiotiques telles que les minerais et les combustibles fossiles. L'IMPACT 2002+ intègre également ces aspects dans son évaluation.

L'empreinte hydrique est mesurée par la *Water Footprint*, qui analyse la consommation et la pollution de l'eau douce, ainsi que par l'ILCD *Water Scarcity*, qui évalue l'impact sur la disponibilité de l'eau potable. En ce qui concerne l'économie circulaire et la gestion des déchets, le MCI permet de mesurer l'efficacité des flux de matériaux, tandis que ReCiPe et EF intègrent ces aspects dans leur analyse globale.

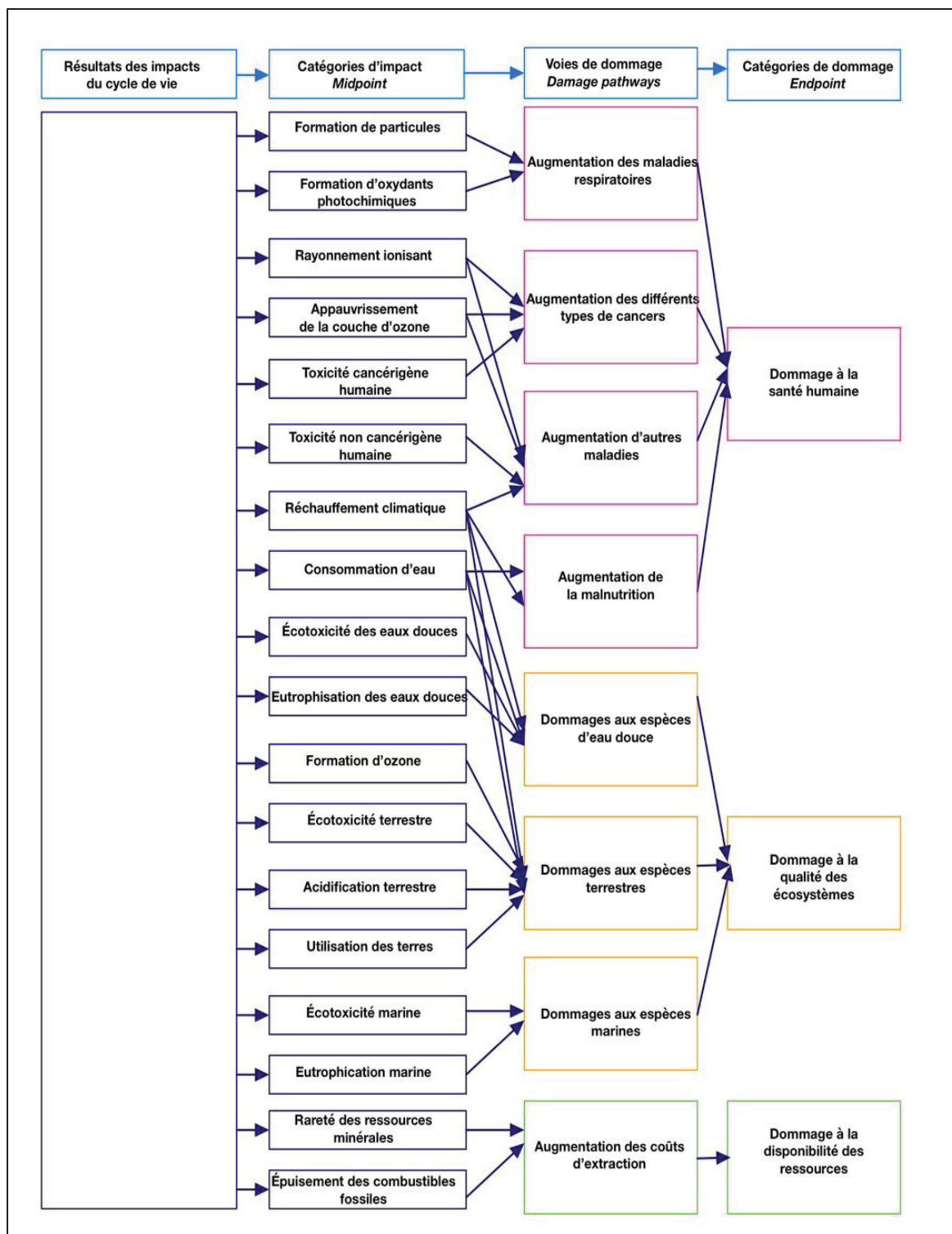


Figure 1.4 Structure de la méthode ReCiPe 2016
Adaptée de M.A.J. de Huijbregts et al. (2016, p. 17)

1.5 Application de l'ACV pour les pompes à chaleur dans les recherches antérieures

De nombreuses études comparatives ont été menées pour évaluer les performances des systèmes pompes à chaleur particulièrement par rapport aux systèmes conventionnels en termes d'IE dans le secteur résidentiel.

(Aridi, Pannier, Aridi & Lemenand, 2024) présentent une recherche approfondie des techniques d'analyse du cycle de vie appliquée aux pompes à chaleur domestiques, en examinant la littérature existante sur les analyses du cycle de vie menées, en discutant des indicateurs environnementaux clés et des paramètres couramment évalués et en indiquant les défis liés à la réalisation des analyses du cycle de vie pour ces systèmes.

Leur étude met en évidence la nécessité de méthodologies normalisées et d'améliorations de la qualité des données et propose des recommandations pour les orientations futures de la recherche afin de soutenir le développement de technologies de chauffage durables dans les structures résidentielles.

1.5.1 Identification des éléments des recherches antérieures

(Aridi et al., 2024) détaillent qu'entre 2010 et 2023, 36 articles ont été publiés, dont 22, soit 61%, au cours des quatre dernières années, entre 2020 et 2023 inclusivement. La majorité des articles, soit 69,5%, ont été réalisés dans des pays européens, accompagnés de leurs études de cas.

Parmi eux, 18 études, représentant 50% des articles, visaient à évaluer l'IE des PACG et des pompes à chaleur sur source terrestre. Parmi elles, six études ont comparé les PACG avec des PACA et cinq autres ont comparé les PACG avec des systèmes de chauffage conventionnels tels que les chaudières à gaz naturel à condensation, à biomasse et à charbon. Enfin, sept études ont évalué les PACG sans effectuer de comparaison (Voir Figure 1.5).

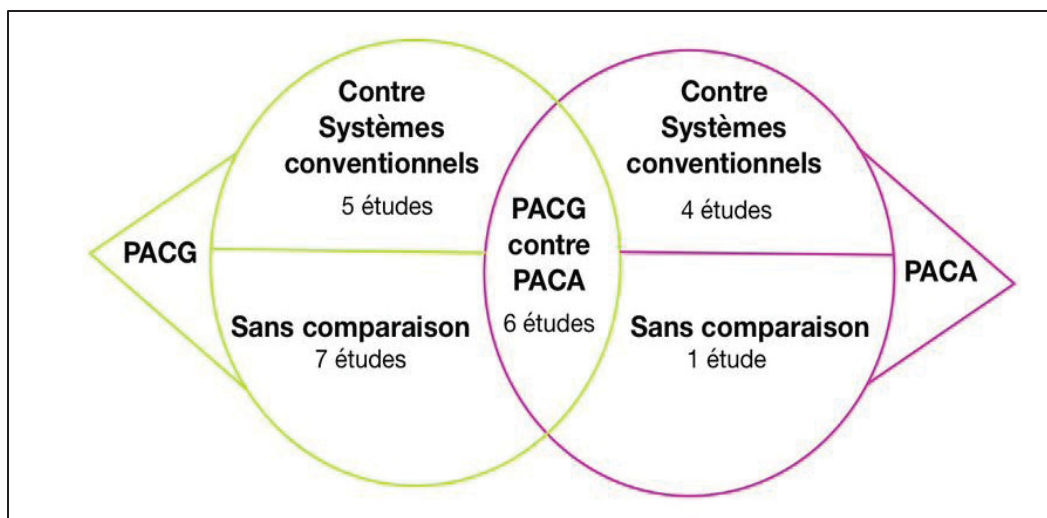


Figure 1.5 Classification des articles selon le type de pompe à chaleur
Adaptée de Aridi et al. (2024)

1.5.2 Disparités entre les études

(Aridi et al., 2024) expliquent que des dissimilarités ont été observées parmi les facteurs qui devraient être comparables, tels que les réfrigérants, le coefficient de performance (COP), l'unité fonctionnelle et la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie.

1.5.2.1 Réfrigérants

Le type de réfrigérant utilisé dans les systèmes de pompes à chaleur affecte considérablement les IE du système. Cependant, cette information n'était pas disponible dans toutes les études, 13 d'entre elles, représentant 36%, ne mentionnant pas le type de réfrigérant utilisé. Ignorer la contribution des réfrigérants à la charge environnementale a créé une dissimilarité majeure. Toutefois, pour les études qui ont précisé les réfrigérants utilisés, soit 30,6% considérant le R134a et 19,5% le R410a, les IE des réfrigérants varient en fonction de facteurs tels que leur composition chimique, leur potentiel de réchauffement global et leur efficacité énergétique.

1.5.2.2 COP

Pour évaluer l'efficacité des pompes à chaleur testées à un moment précis, 27 études, soit 75%, ont présenté le COP comme une mesure significative et comparable. Parmi celles-ci, cinq études ont défini et testé le COP saisonnier.

1.5.2.3 Unité fonctionnelle

Une grande variation dans les unités fonctionnelles a été observée dans la littérature. 53% des études ont utilisé l'énergie thermique en Watt-heures (en kWh ou MWh) comme unité fonctionnelle, 11% ont utilisé l'énergie thermique en Joules (en MJ ou GJ) et 19% ont fait référence à la durée de vie (en années) comme leur unité fonctionnelle. Cependant, 11% des études n'ont pas mentionné leur unité fonctionnelle.

L'unité fonctionnelle reflète le service rendu par le système, pas juste une mesure physique comme l'énergie. Une unité fonctionnelle en kWh thermique indique qu'on évalue le système en fonction de la quantité d'énergie utile produite. Une unité fonctionnelle en MJ peut être utilisée quand on se concentre davantage sur le contenu énergétique absolu, sans tenir compte des pertes ou de l'efficacité du système.

Le système est par exemple une pompe à chaleur avec un COP de 4. Pour fournir 1 000 kWh de chaleur, elle consomme seulement 900 MJ d'électricité. L'ACV évalue donc les impacts sur cette base, en tenant compte de l'énergie réellement consommée pour un service donné.

1.5.2.4 Méthode de l'analyse

Certaines des méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie ont utilisé la perspective *Midpoint* à des stades intermédiaires des chaînes de cause à effet. Elles se concentrent notamment sur des facteurs de stress environnementaux spécifiques, tels que les gaz à effet de serre et l'acidification. Cependant, d'autres ont adopté la méthode *Endpoint* où l'évaluation portait sur les résultats finaux, tels que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes. Finalement, certaines études ont choisi d'utiliser les deux approches, le *Midpoint* et le *Endpoint*. Le système de pondération proposé entre le *Midpoint* et le *Endpoint* visait

principalement à mettre en évidence l'importance relative des indicateurs *Midpoints* en fonction des catégories d'influence qu'ils exercent sur les *Endpoints* (Voir Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Méthodes considérées dans les recherches pour l'ACV des PACG
Adaptée de Aridi et al. (2024)

| Méthode ACV | PACG | PACG contre PACA |
|---|---|---|
| CML (1992, 2000, 2001) | | (Sevindik et al., 2021) (<i>Midpoint</i> et <i>Endpoint</i>) (Greening & Azapagic, 2012) (<i>Midpoint</i>) |
| ReCiPe (2008, 2016) (<i>Midpoint</i> et <i>Endpoint</i>) | (Zhang et al., 2022) (Smith et al., 2021) (Bonamente & Aquino, 2017) (Saner et al., 2010) | (Aresti et al., 2022) (Sevindik et al., 2021) (Marinelli et al., 2020) |
| EF méthode 3.0 (<i>Midpoint</i>) | (Famiglietti, Gerevini et al., 2021) | |
| IMPACT 2002+ (<i>Midpoint</i> et <i>Endpoint</i>) | (Zhang et al., 2022) | (Violante et al., 2022) |
| Eco-Indicator (95 et 99) | (Koroneos & Nanaki, 2017) (<i>Midpoint</i>) (Abusoglu & Sedeeq, 2013) (<i>Midpoint</i> et <i>Endpoint</i>) | |
| (IPCC 2001, ...) (<i>Midpoint</i> et <i>Endpoint</i>) | (Zhang et al., 2022) | (Marinelli et al., 2020) |

1.5.3 Évaluation des IE

(Aresti, Florides, Skaliontas & Christodoulides, 2022) proposent une enquête comparative du sud au nord de l'Europe sur l'IE des systèmes de PACG. Celles-ci comme étant une alternative aux PACA conventionnelles, puisqu'elles présentent une efficacité supérieure. Dans leur étude, cette différence d'efficacité est examinée afin de déterminer les performances des systèmes en termes d'IE dans sept régions.

Trois types de systèmes avec différentes configurations d'échangeurs géothermiques sont comparés aux PACA. Dans le cadre d'une analyse du cycle de vie, ils utilisent la méthode ReCiPe, à la fois selon les perspectives *Midpoint* et *Endpoint*. De plus, une méthode simple est utilisée pour examiner la période de retour sur investissement en dioxyde de carbone des systèmes géothermiques par rapport aux systèmes à source d'air. Deux scénarios d'analyse de sensibilité ont aussi été étudiés : dans le premier, le COP des PACA a été augmenté par incréments de 10%, dans le second, la différence de COP entre les PACG et les PACA a été augmentée par incréments de 10%.

Ils en concluent notamment que l'utilisation des PACG dans les bâtiments résidentiels peut constituer une solution plus respectueuse de l'environnement que les PACA pour six régions sur sept. Cette conclusion s'applique également pour les bâtiments à énergie quasi nulle avec une faible demande de chauffage et de refroidissement. Cependant, cela dépend des facteurs influençant l'ensemble de l'analyse, à savoir ; les caractéristiques thermiques du sol, la demande de chauffage et de refroidissement, les charges de pointe en chauffage et en refroidissement ainsi que le mix électrique.

Par ailleurs (Violante, Donato, Guidi & Proposito, 2022) ont aussi mené une analyse comparative du cycle de vie entre la PACG et la PACA en Italie en employant la méthode IMPACT 2002+ *Midpoint* et *Endpoint*.

L'article met en évidence que le système de PACG est globalement plus économe en énergie et présente un IE à long terme inférieur par rapport à un système de PAC traditionnel. En effet, ce composant présente des impacts significatifs par rapport aux autres éléments du système à source d'air durant les phases de fabrication et d'installation. Toutefois, pendant la phase opérationnelle, la PACA enregistre des impacts légèrement plus élevés.

Dans le même contexte, (Sevindik, Spataru, Aparisi & Bleischwitz, 2021) présentent une évaluation environnementale comparative des PACG et des PACA avec des chaudières à gaz au Royaume-Uni.

L'étude analyse la situation de l'époque à l'aide d'un modèle de référence et évalue les applications futures à travers les scénarios d'économie circulaire, d'efficacité des ressources et de croissance limitée avec la méthode ReCiPe *Midpoint*. Aussi, des applications hybrides de technologies bas-carbone et différents scénarios de fabrication sont étudiés selon les modèles de référence et les scénarios d'économie circulaire.

Les résultats entre autres montrent que les phases d'utilisation et de fabrication sont responsables en moyenne de 74% et 14% de l'ensemble des IE. Bien que le mix électrique du Royaume-Uni ait été considérablement décarboné au cours de la décennie précédente, les pompes à chaleur présentent encore des IE globaux plus élevés que les chaudières à gaz dans toutes les catégories. Cependant, l'étude exclue la catégorie relative au changement climatique. D'autre part, lorsque les pompes à chaleur sont comparées, les systèmes géothermiques affichent des résultats inférieurs de 17% par rapport aux systèmes à source d'air, car ils nécessitent moins d'électricité en raison de leur efficacité supérieure.

Enfin, une analyse comparative de l'efficacité énergétique des PACG résidentiels dans le New Jersey a été réalisée par (Smith, Bevacqua, Tembe & Lal, 2021). En s'appuyant sur l'analyse du cycle de vie des systèmes, ils ont considéré la méthode ReCiPe *Midpoint* et *Endpoint*.

Les résultats montrent que l'État constitue un emplacement adapté pour les PACG résidentiels, et qu'un mix énergétique intégrant une utilisation accrue des sources d'énergie renouvelable améliorerait encore davantage l'efficacité de cette technologie tout en réduisant les émissions associées.

En outre, la comparaison de cette technologie avec d'autres méthodes courantes de chauffage et de refroidissement des espaces met en évidence ses avantages. L'utilisation des systèmes géothermiques, combinés à des systèmes de chauffage et de refroidissement électrique, permet une réduction substantielle des émissions environnementales.

Par rapport au chauffage à base de fioul et de gaz, les PACG permettent une certaine amélioration des facteurs d'impact intermédiaires et une amélioration considérable des facteurs

d'impact finaux. Ces bénéfices sont particulièrement visibles sur le plan économique, notamment grâce à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Le bâtiment se situe à Montréal, c'est un espace commercial qui servira d'épicerie. La superficie totale du local est égale à 683 m² avec une hauteur des murs de 5 m.

(Chen, Dai & Cai, 2022) précise que « le choix du logiciel est un élément important pour réaliser la recherche de la thèse. Un choix judicieux de logiciel peut non seulement simplifier la recherche, mais également rendre les résultats de recherche plus précis ».

Dans ce chapitre, une première étape consiste à effectuer la modélisation énergétique des charges du bâtiment, incluant la conception architecturale en 3D sur SketchUp et la simulation des charges thermiques avec OpenStudio et EnergyPlus.

Une seconde étape porte sur le dimensionnement du système géothermique à l'aide de Python, en abordant la sélection des thermopompes, les calculs des charges au sol, des longueurs des puits, des pertes de charge, ainsi que la consommation électrique.

Une dernière étape implique une ACV réalisée sur SimaPro 9.6, intégrant la définition des objectifs, la collecte des données d'inventaire et l'évaluation des IE selon un scénario alternatif.

2.1 Modélisation énergétique des charges du bâtiment

Avant de concevoir un système de chauffage, il est nécessaire de spécifier la demande de chauffage des bâtiments afin de déterminer la capacité de l'unité de production de chaleur.

« Divers types d'outils de simulation ont été développés pour atteindre cet objectif. Certains outils fournissent une conception géométrique et graphique des bâtiments, appelés outils BIM, tels que SketchUp et Revit, tandis que d'autres sont utilisés pour la simulation et l'analyse énergétique, appelés outils de simulation énergétique des bâtiments (BES), comme EnergyPlus et eQUEST » (Abbaspour, Yousefi, Aslani & Noorollahi, 2022).

Dans cette étude, trois outils de simulation ont été utilisés, à savoir EnergyPlus, OpenStudio et SketchUp. EnergyPlus est un programme basé sur une console qui lit et écrit uniquement des fichiers texte, développé par le Département de l'Énergie (DOE) des États-Unis. EnergyPlus ne dispose pas d'une interface visuelle pour la conception graphique ; par conséquent, SketchUp est utilisé comme interface pour fournir des modèles 3D des bâtiments. OpenStudio est une autre interface pour EnergyPlus, utilisée comme plug-in pour SketchUp (Abbaspour et al., 2022).

2.1.1 Conception architecturale et modélisation 3D sur SketchUp

L'analyse des caractéristiques géométriques du plan d'architecture a permis de réaliser une représentation tridimensionnelle du bâtiment sur SketchUp (Voir Figure 2.1). SketchUp se distingue par son interface intuitive, sa compatibilité avec plusieurs formats de fichiers et l'intégration d'extensions, permettant une meilleure flexibilité par rapport à d'autres outils de modélisation.

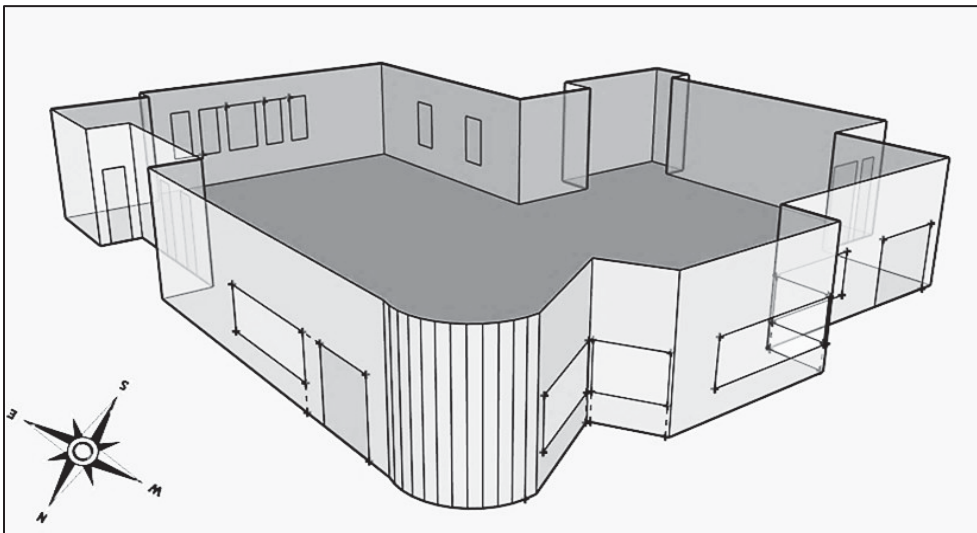


Figure 2.1 Vue de la représentation 3D de local commercial sur SketchUp

La zone climatique internationale ensuite choisie est celle de Montréal, soit froide et humide, 6A conformément à la norme ASHRAE 90.1-2010 de l'ANNEXE I.

« L'ASHRAE 90.1, élaborée par la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation, est un ensemble complet de lignes directrices utilisé pour mesurer l'énergie dans les bâtiments commerciaux. [...] Elle détaille les critères minimaux d'efficacité énergétique applicables à la conception et à la construction de nouveaux bâtiments, ainsi qu'à leurs systèmes » (ASHRAE, 2022). Cette norme a servi et sert à la mise à jour du code modèle de l'énergie canadien et a servi à la mise à jour de la réglementation du Québec.

Une seule zone thermique est ensuite créée tel que les configurations de construction, de type d'espace et de calendriers suivent des ensembles standard pour les marchés de vente de produits, adaptés aux besoins d'une épicerie. Elles sont générées automatiquement à partir de la librairie selon la norme ASHRAE.

Une zone thermique est une région du bâtiment contrôlée à une certaine température. Cette région est supposée être relativement homogène, et tout ce qui se trouve à l'intérieur de cette zone peut être traité comme étant essentiellement à la même température et dans les mêmes conditions. Une zone thermique est également très fondamentale pour les calculs d'EnergyPlus, elle constitue la base des calculs de transfert de chaleur.

2.1.2 Simulation des charges thermiques avec OpenStudio et EnergyPlus

Afin d'évaluer les performances énergétiques du bâtiment, le fichier météo de Montréal est utilisé avec des horaires de fonctionnement pour le chauffage et la climatisation par priorité, selon la journée de dimensionnement (Voir Figure 2.2). Les données météorologiques étant organisées par région de l'organisation météorologique mondiale et par pays. Par ailleurs, pour la période d'été du 1er juin au 31 août seul le système de refroidissement fonctionne avec une température consigne de 30°C de 22h à 6h et 24°C le restant de la journée alors que pour la période du 1er septembre au 31 mai elle est de 16°C et 21°C pendant les mêmes plages horaires, ce qui nécessite le chauffage du local.

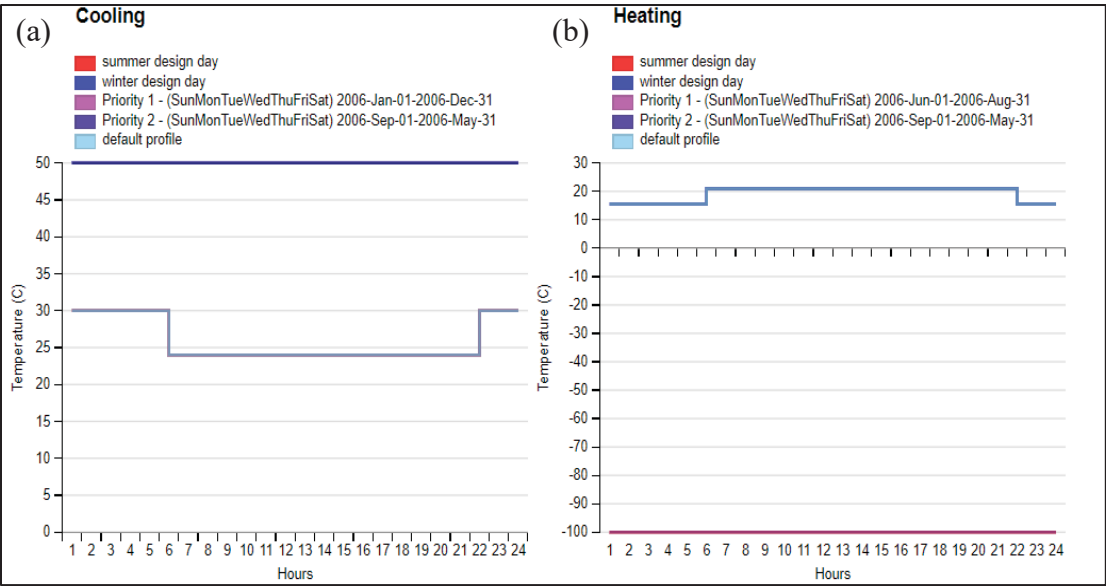


Figure 2.2 Horaires de fonctionnement
(a) Climatisation (b) Chauffage

Les constructions de surfaces (Voir Tableau 2.1) ainsi que les charges internes, représentées par une densité d’occupants de 0,1 occupant/m², une puissance d’éclairage de 8 W/m² et une charge d’équipements électriques de 4 W/m², sont paramétrées automatiquement par le logiciel respectant la même norme ASHRAE.

Tableau 2.1 Propriétés thermiques des éléments extérieurs de l’enveloppe

| Type de construction | Coefficient de transfert thermique U - Proposé dans cette étude (W/m ² K) | Surface (m ²) | Coefficient de transfert thermique U maximal - RBQ 2024 (W/m ² K) |
|----------------------------|--|------------------------------|--|
| Toiture | 0,17 | 683,46 | 0,18 |
| Murs extérieurs | 0,48 | 602,66 | 0,28 |
| Portes Extérieure | 1,2 | 33,05 | 0,9 |
| Fenêtres fixes extérieures | 3 | 35,65 | 2 |
| Plancher extérieur | 1,08 | 683,46 | 0,18 |

La répartition mensuelle des charges de chauffage et de climatisation suivant la température sèche moyenne extérieure (Voir Figure 2.3), pour une consommation annuelle finale de 87 MWh en chauffage et 9 MWh en refroidissement. Les charges horaires de chauffage et de climatisation sont calculées sur EnergyPlus.

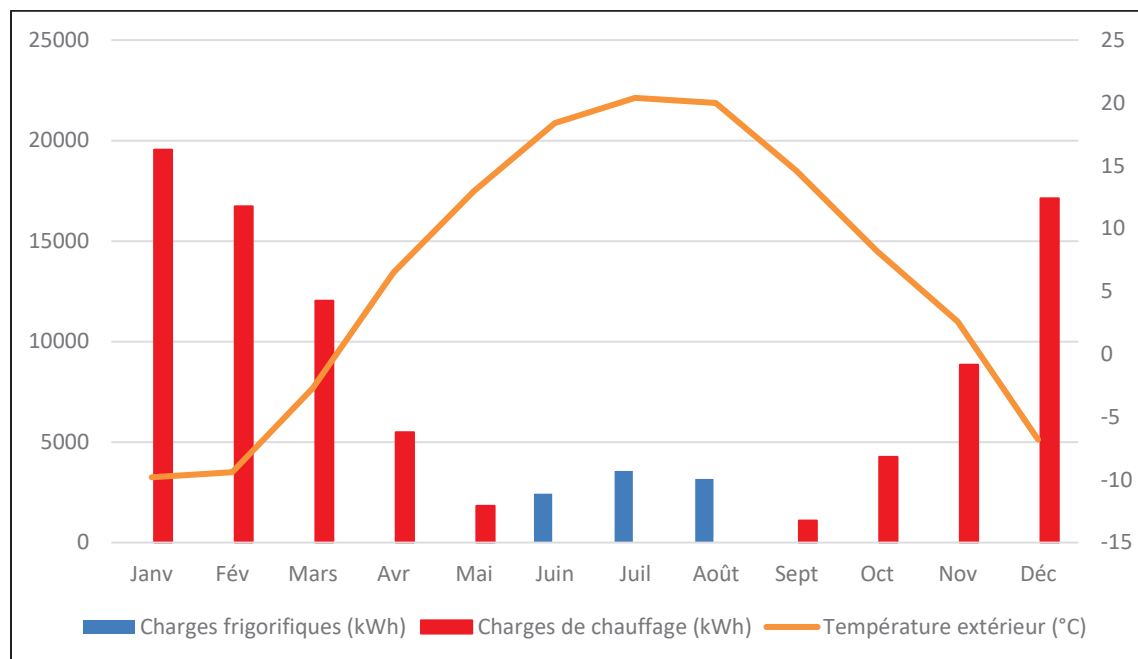


Figure 2.3 Profils de charges mensuels en chauffage et climatisation

Selon (Ressources naturelles Canada, 2011), 4% de la consommation d'énergie dans le secteur commercial et institutionnel concerne la climatisation et 54% sert au chauffage des locaux, dans ce cas 7% représentent la part de la climatisation et 68% celle du chauffage.

2.2 Dimensionnement du système géothermique sur Python

L'utilisation d'un langage de programmation pour automatiser les tâches répétitives, résoudre des équations complexes et gérer des volumes importants de données est une nécessité dans le domaine de l'ingénierie. La conception globale du système géothermique est donc ensuite réalisée sur Python (ANNEXE II) pour déterminer la consommation électrique finale des pompes.

2.2.1 Sélection des thermopompes

(La Stratégie énergétique du Québec, 2006-2015) indique qu'il est suggéré de satisfaire 100% de la charge de climatisation ou au maximum 70% de la charge de chauffage avec la géothermie. Ceci permet de minimiser le nombre de puits et de réduire les investissements [...]. Il n'est pas rentable de viser à satisfaire 100% de la charge avec la géothermie, il faut plutôt considérer la charge horaire maximale optimisant la rentabilité.

À partir des charges horaires, les maximums sont donc obtenus pour le chauffage et la climatisation respectivement égale à 164 kBTU/h et 105 kBTU/h soit 48 kW et 31 kW. Pour satisfaire la demande quatre pompes à chaleur eau-air de type TS H/V/D 060 sont choisies (ANNEXE III) avec une capacité totale fournie égale pour le chauffage à 203 kBTU/h et pour la climatisation à 256 kBTU/h soit 59 kW et 75 kW. Les coefficients de performance sont de 4,1 et 4,77 respectivement et la température minimale de l'eau à l'entrée de la pompe à chaleur est équivalente à 40°F en chauffage et 85°F en climatisation avec un débit unitaire égal à 11,3 gpm.

(Lamarche, 2024) précise que les informations pratiques pour la conception des systèmes sont disponibles auprès des fabricants et sont régies par les normes AHRI/ASHRAE ISO : 13256-1 pour les pompes à chaleur eau-air et 13256-2 pour les pompes à chaleur eau-eau.

Ces normes spécifient les conditions nominales dans lesquelles les pompes à chaleur doivent être testées. Les données de performance dans des conditions non nominales devraient également être fournies afin de corriger les performances dans des applications réelles.

2.2.2 Charges au sol

Les propriétés thermiques du sol sont telles que la température est égale à 10°C (Pasquier, 2012), la conductivité à 1,98 W/mK (Lamarche, 2024) et la diffusivité à 0,0557 m²/jr (Patin, 2020). Il est important de souligner que la conception d'un système géothermique dépend des propriétés thermiques du sous-sol. Ces propriétés sont ; la conductivité thermique, la température non perturbée du sol, la diffusivité thermique, la capacité thermique. Elles peuvent varier pour différentes localisations géographiques et sont par conséquent calculées à partir

d'un essai de réponse thermique (Javed, 2010). Plusieurs recherches ont été menées dans le développement de nouvelles approches pour les tests de réponses géothermiques.

Les charges au sol horaires puis mensuelles (Voir Tableau 2.2) sont d'abord calculées, par bloc horaire de 6 heures, pour une configuration centrale qui relie les quatre pompes à chaleur à un seul puits géothermique (Voir Figure 2.4) (ANNEXE IV).

Ces charges permettent de déduire les pulses horaires afin de déterminer la température moyenne minimale du fluide caloporteur circulant dans le système. Cette température, qui est de 1,6 °C, est supérieure à la température de solidification égale à -7,4°C pour le mélange eau propylène-glycol à 20% (ANNEXE V), tel que demandé dans la norme CAN/CSA-C448.

Tableau 2.2 Valeurs des charges au sol mensuelles

| Mois | Charges au sol (W) |
|-----------|--------------------|
| Janvier | 19 738 |
| Février | 18 246 |
| Mars | 12 123 |
| Avril | 5 541 |
| Mai | 1 639 |
| Juin | -3 982 |
| Juillet | -5 929 |
| Août | -5 033 |
| Septembre | 1 275 |
| Octobre | 4 650 |
| Novembre | 9 557 |
| Décembre | 17 441 |

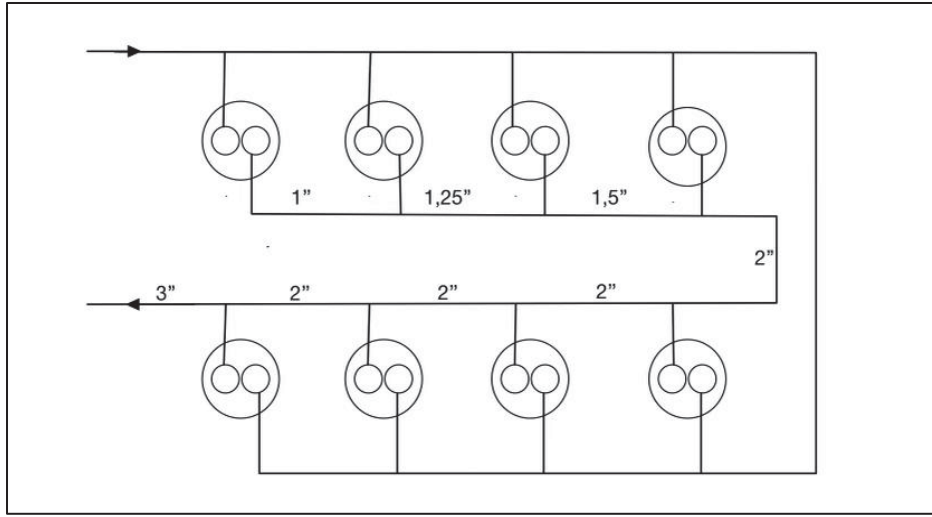


Figure 2.5 Conception du champ géothermique centralisé

Pour calculer la longueur des puits avec la méthode suédoise (2.1a) et (2.1b), il est d'abord nécessaire de calculer la résistance thermique du puits (2.2a) et (2.2b).

$$L = \frac{SCT + q_b(tf)R_b}{T_0 - \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2}} \quad (2.1a)$$

$$SCT = \frac{1}{2\pi k_s} \left(\sum_{i=mois_ini}^{Np-1} (q_{m,i} - q_{m,i-1})g(\bar{t}_f - \bar{t}_v, \bar{r}_b) + (q_{hr} - q_{m,Np-1})(\overline{bloc_horaire}, \bar{r}_b) \right) \quad (2.1b)$$

Pour ce faire, la méthode de la ligne source finie, développée par Hellström (2.2c), est choisie comme approche pour le calcul de la résistance du coulis.

$$R_b = R_c + \frac{R_p}{2} \quad (2.2a)$$

Tel que :

$$\begin{cases} R_p = R_{conv} + R_{cond} \\ R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_{pi} h_{conv}} \\ R_{cond} = \frac{\ln(r_{po}/r_{pi})}{2\pi k_p} \end{cases} \quad (2.2b)$$

Et,

$$R_c = \frac{1}{4\pi k_c} \left(\ln\left(\frac{r_b}{r_{po}}\right) + \ln\left(\frac{r_b}{2x_c}\right) + \sigma \ln\left(\frac{(r_b/x_c)^4}{(r_b/x_c)^4 - 1}\right) \right) \quad (2.2c)$$

On obtient finalement une résistance du puits de 0,098 Km/W et une résistance effective du puits de 0,12 Km/W. La longueur totale est égale à 2 379 m et la hauteur de chaque puits est de 279 m qui est inférieur à la contrainte de 300 m.

2.2.4 Pertes de charges

Les pertes de charge (ANNEXE VI) correspondent aux pompes à chaleur, au collecteur, à la boucle géothermique et aux interconnexions (Voir Tableau 2.3). C'est la somme des pertes de charges linéaires, singulières et celles des valves (2.3). À l'intérieur du bâtiment, le circuit avec les pertes de charge les plus élevées est évalué.

$$h_{pertes_charges} = \sum f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{u^2}{2g} + \sum f \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{u^2}{2g} + \frac{S_g}{\rho g} \sum \left(\frac{\dot{V}}{C_v} \right)^2 \quad (2.3)$$

À partir des pertes de charge totales égales à 24 m et le débit total du fluide circulant dans le système qui est égal à 45,2 gpm, on sélectionne trois pompes parallèles de circulation Standard NPSH 5SV à vitesse variable avec un rendement de 69,9% (ANNEXE VII).

Tableau 2.3 Pertes de charge de l'installation géothermique

| Système centralisé | Connexions | Pertes de charge totales (m) |
|---|-------------------|------------------------------|
| PAC | Hoze-kit | 5 |
| | Y-strainer | |
| | Ball valves | |
| Collecteur | Butt 90° | 0,4 |
| | Butt tee-straight | |
| | Butt reducer | |
| Boucle géothermique et interconnexions | Butt 90° | 19 |
| | Butt tee-branch | |
| | Unicoil | |

2.2.5 Consommation électrique

La consommation électrique totale de la pompe de circulation intermittente, si le temps d'opération dépend du fonctionnement du compresseur, est de 6 118 kWh (2.4.a) et (2.4.b), celle du compresseur pour le chauffage est équivalente à 21 255 kWh et pour la climatisation à 1 918 kWh (2.5.a). Ainsi la consommation électrique totale de l'installation géothermique est égale à 29 292 kWh (2.5.b).

$$W_{pompe} = \dot{m}_{pompe} \times g \times h_{pertes_charges} \quad (2.4.a)$$

$$P_{elec,pompe} = \frac{W_{pompe}}{\eta_{pompe}} \times t_{op} \quad (2.4.b)$$

$$W_{ch} = \frac{q_{ch}}{COP_{ch}} \quad (2.5.a)$$

$$W_{cl} = \frac{q_{cl}}{COP_{cl}} \quad (2.5.b)$$

2.3 ACV de la PACG sur SimaPro 9.6

L'ACV est réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 9.6, car il contient plusieurs méthodes d'évaluation des impacts ainsi qu'un inventaire étendu de bases de données, qui est modifié pour mieux correspondre aux paramètres d'analyse dans la zone d'étude.

2.3.1 Définition des objectifs et du champ d'application

L'objectif de l'ACV de la PACG est d'évaluer les performances des systèmes commerciaux opérant à Montréal afin d'estimer leurs IE globaux.

L'unité fonctionnelle retenue est de 96 MWh/an sur une durée de 25 ans, représentant les charges annuelles de chauffage et de climatisation de l'épicerie.

Les frontières du système, comme illustré à la Figure 2.6, englobent l'ensemble du cycle de vie d'un système géothermique, incluant : le forage des puits, l'injection du coulis, l'installation de l'échangeur de chaleur géothermique vertical, la fabrication et la mise en place de la pompe à chaleur, le fonctionnement du système, ainsi que le traitement en fin de vie.

Les matières premières, l'eau, l'électricité, le gaz naturel et le diesel représentent les intrants dépendamment de la phase considérée. Les émissions vers la biosphère sont prises en compte pour la production et l'installation de l'échangeur et de la pompe à chaleur ainsi que pour l'exploitation annuelle. Pour la phase de fin de vie, seules les émissions vers la technosphère sont examinées.

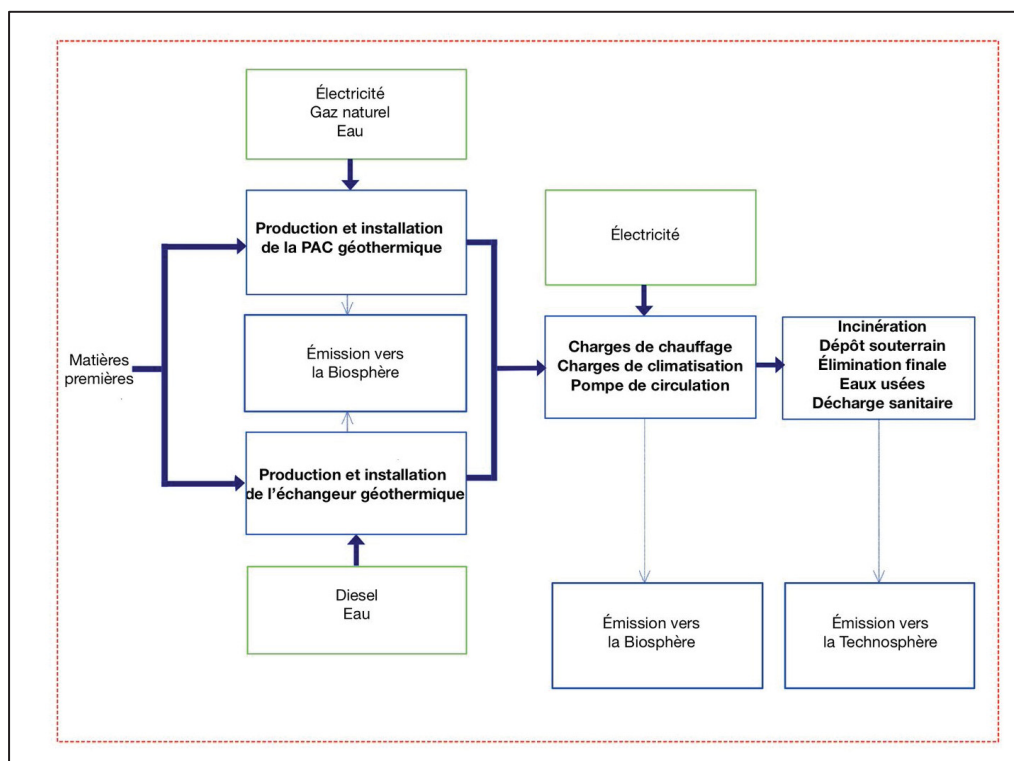


Figure 2.6 Frontières du système géothermique pour l'ACV

2.3.2 Données d'inventaire

Les données utilisées pour cette analyse proviennent de la base de données Ecoinvent 3.10 ainsi que d'autres sources académiques. Les calculs ont été réalisés afin de représenter les phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement d'une unité de PACG commerciale située à Montréal. Cette analyse repose sur l'unité fonctionnelle définie dans l'étude.

La masse des tuyaux du circuit géothermique, du fluide caloporteur et du coulis pendant la phase de production et installation de l'échangeur géothermique a été déterminée à l'aide de calculs de volume basés sur la longueur totale du forage (Voir Tableau 2.4).

Les conduites en PEHD sont installées dans le forage en forme de U, ce qui signifie que la longueur totale du tuyau correspond au double de la longueur du forage. Avec une hauteur d'un seul puits égale à 279 m, la longueur totale de forage pour les huit puits est de 2 236 m, la longueur de tuyauterie requise est donc de 4 472 m.

Les diamètres intérieurs et extérieurs étant respectivement équivalents à 0,049 m et 0,06 m, le volume total des tuyaux est alors égal au volume extérieur moins le volume intérieur ce qui donne 4,21 m³. Ces conduites en PEHD possèdent une masse volumique d'environ 950 kg/m³, ce qui correspond à une masse totale de 4 000 kg de tuyaux requis.

Avec un volume interne total de 8 m³, les conduites sont remplies d'une solution de glycol composée de 20% de propylène glycol et de 80% d'eau, ce qui résulte d'un volume de propylène glycol égal à 1,7 m³ de masse volumique de 1040 kg/m³ et de volume d'eau égale à 6,7 m³. La masse totale de propylène glycol s'élève alors à 1 757 kg.

Le coulis remplit l'intégralité du volume du forage, moins le volume occupé par la tuyauterie. Chaque puits ayant un diamètre 0,15 m, le volume total du forage est de 39,5 m³, auquel on soustrait le volume total externe des tuyaux de 12,6 m³, ce qui donne un volume requis de 26,8 m³ de coulis. Le coulis est composé de 98,45% de bentonite soit 26,4 m³ avec une masse volumique de bentonite de 2 400 kg/m³, 1,17% de ciment soit 0,3 m³ avec une masse volumique de 3 150 kg/m³ et 0,37% eau soit 0,1 m³. Ce qui correspond à 63 441 kg de bentonite et 989 kg de ciment.

(Saner, Juraske, Kübert, Blum, Hellweg & Bayer, 2010) proposent que les forages soient réalisés à l'aide de la technique de rinçage ou de marteau hydraulique, consommant respectivement 1,5 ou 2,5 litres de diesel par mètre. Dans l'inventaire, une valeur moyenne de 2,1 litres/m est utilisée. Le pouvoir calorifique du diesel étant de 10 kWh/litre, l'énergie totale alors consommée pour le forage de 2236 m est égale à 47 MWh.

Tableau 2.4 Données d'inventaire du système géothermique pour l'ACV de la phase de production et d'installation de l'échangeur de chaleur

| Phase | Étape / Composant | Entrée | Unité | Quantité |
|---|-------------------------------|-------------------|----------------|----------|
| Production et installation de l'échangeur de chaleur géothermique | Forage et injection du coulis | Eau | m ³ | 0,1 |
| | | Diesel | MWh | 47 |
| | | Bentonite activée | kg | 63 441 |
| | | Ciment | kg | 989 |
| | Tuyauterie | PEHD | kg | 4 000 |
| | Fluide caloporteur | Eau | m ³ | 6,7 |
| | | Propylène glycol | kg | 1 757 |

(Violante et al., 2022) ont proposé un inventaire détaillé des matériaux et de l'énergie nécessaires à la fabrication de la PACG, exprimé en kg/kWh d'énergie thermique requise pour répondre aux besoins de chauffage et de climatisation. De leur côté, (Smith et al., 2021) ont utilisé un inventaire basé sur une thermopompe géothermique d'une puissance représentative de 10 kW, incluant également l'énergie consommée.

Pour évaluer les quantités des matériaux durant la fabrication et celles de l'électricité et le gaz naturel pendant l'assemblage, les deux études ont été d'abord prises en compte afin de savoir si les valeurs trouvées dans les deux cas sont cohérentes (Voir Tableau 2.5).

Pour la première analyse de (Violante et al., 2022) les valeurs sont multipliées par 96 MWh/an sur une durée de 25 ans, soit la charge thermique pour le chauffage et la climatisation dans ce cas.

Pour la seconde analyse de (Smith et al., 2021) celles-ci sont divisées par la puissance de 10 kW et multipliée par 59 kW correspondants la puissance totale des pompes à chaleur de cette étude.

Une quantité de 0,3 kg de fluide frigorigène par kW est nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Cette valeur correspond à une moyenne issue des résultats de tests réalisés par le centre de test suisse des pompes à chaleur (Saner et al., 2010). Pour une puissance totale de 59 kW fonctionnant au R410a, la quantité requise est égale à 18 kg.

Le fluide frigorigène utilisé est le R410a. Cependant, pour l'évaluation environnementale, le R134a de la base de données Ecoinvent est sélectionné, conformément aux recommandations de (Russo, Anifantis, Verdiani & Mugnozza, 2014).

Il convient de souligner que l'élimination progressive du R410a s'inscrit dans un mouvement global visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à lutter contre le changement climatique. Son potentiel de réchauffement climatique s'élevant à 2088 kg CO₂ eq/kg, en fait un contributeur important au réchauffement de la planète.

La production de R410a sera progressivement réduite et devrait être interdite d'ici 2026. Cela signifie que la fabrication de nouveaux équipements utilisant ce réfrigérant cessera à cette date. L'industrie du HVAC a développé des alternatives au R410a qui offrent des performances comparables tout en réduisant leur IE. Parmi les principaux choix figurent le R454b et le R32. (Violante et al., 2022) suggèrent que la contribution du transport des composants de l'installation géothermique est négligeable. Par ailleurs, (Hunter, 2015) dans son étude réalisée en Ontario, estime que la contribution du transport à l'IE global du système géothermique est inférieure à 1%. Par conséquent, le transport n'a pas été pris en compte dans cette étude.

Tableau 2.5 Données d'inventaire du système géothermique pour l'ACV de la phase de production et d'installation de la pompe à chaleur

| Phase | Étape / Composant | Entrée | Unité | Quantité | |
|---------------------------------------|--|------------------------|-------|----------------------|-------------------------|
| | | | | (Smith et al., 2021) | (Violante et al., 2022) |
| Production et installation de la PACG | Assemblage | Électricité | kWh | 828 | 877 |
| | | Gaz naturel | MWh | 2,2 | 2,3 |
| | Boîtier et compresseur | Acier d'armature | kg | 422 | 702 |
| | Évaporateur et condenseur | Acier faiblement allié | kg | 112 | 187 |
| | Câblage, tuyauterie et valve d'expansion | Cuivre | kg | 130 | 206 |
| | Isolation des câbles | PVC | kg | 6 | 9 |
| | Isolation des tuyaux | Élastomère | kg | 56 | 94 |
| | Réfrigérant | R134a | kg | 18 | 18 |

La répartition de la consommation électrique spécifique au chauffage, à la climatisation et à la pompe de circulation durant la phase d'exploitation annuelle est présentée dans le Tableau 2.6, telle que calculée précédemment.

Tableau 2.6 Données d'inventaire du système géothermique pour l'ACV de la phase d'exploitation annuelle

| Phase | Entrée | Unité | Quantité |
|-----------------------|--|-------|----------|
| Exploitation annuelle | Électricité pour le chauffage | kWh | 21 255 |
| | Électricité pour la climatisation | kWh | 1 918 |
| | Électricité pour la pompe de circulation | kWh | 6 118 |

Enfin, les sorties considérées vers la technosphère pendant la phase de fin vie sont; le ciment, le polyéthylène, l'acier d'armature, l'acier faiblement allié, le cuivre, le polychlorure de vinyle (PVC), l'élastomère et le réfrigérant R134a (Voir Tableau 2.7).

Tableau 2.7 Données d'inventaire du système géothermique pour l'ACV de la phase de fin de vie

| Phase | Entrée | Traitement | Unité | Quantité |
|------------|------------------------|--|-------|----------|
| Fin de vie | Diesel | Incinération Dépôt souterrain | MWh | 47 |
| | Bentonite activée | Dépôt souterrain Élimination finale Eaux usées | kg | 9 667 |
| | PEHD | Incinération Eaux usées | kg | 4 000 |
| | Propylène glycol | Eaux usées | kg | 1 757 |
| | Acier faiblement allié | Élimination finale | kg | 187 |
| | Cuivre | Décharge sanitaire | kg | 206 |
| | PVC | Incinération Eaux usées | kg | 9 |
| | Élastomère | Décharge sanitaire Eaux usées | kg | 94 |
| | Réfrigérant R134a | Incinération | kg | 18 |

2.3.3 Approche d'évaluation des IE avec un scénario alternatif

Dans cette étude deux méthodes de calcul pour l'ACV ont été utilisées. TRACI 2.1 et ReCiPe 2016.

Selon (Chu, 2019), l'outil pour la réduction et l'évaluation des impacts chimiques et autres IE TRACI 2.1/Canada2005 a été développé par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) des États-Unis. Il s'agit d'une méthodologie d'évaluation des impacts du cycle de vie spécifique aux sites, au niveau *Midpoint*, avec un horizon temporel de 100 ans.

Les facteurs de caractérisation utilisés dans cette méthodologie ont été initialement élaborés à partir d'études menées aux États-Unis et ont toujours été sélectionnés pour les études menées en Amérique du Nord. En raison des similarités entre les conditions aux États-Unis et au Canada, cette méthodologie peut également être appliquée au Canada.

Cette méthodologie couvre 10 principales CI : appauvrissement de la couche d'ozone, réchauffement climatique, formation de smog, acidification, eutrophisation, effets cancérigènes, effets non cancérigènes, effets respiratoires, écotoxicité, épuisement des combustibles fossiles.

Elle définit l'appauvrissement de la couche d'ozone comme étant une désignation commune regroupant deux phénomènes distincts : l'épaississement de la couche d'ozone et l'apparition du trou d'ozone stratosphérique. Pour expliquer la formation de smog, elle évoque que l'ozone troposphérique (ou ozone au niveau du sol) se forme à la suite de diverses réactions chimiques impliquant les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV) sous l'action du rayonnement solaire. Par ailleurs, elle explique que les particules en suspension sont un mélange de petites particules solides ou liquides présentes dans l'air ambiant, pouvant endommager le système respiratoire des êtres humains. Enfin, concernant la toxicité potentielle pour la santé humaine causant des effets cancérigènes ou non cancérigènes ainsi que pour les écosystèmes, elle mentionne qu'elle est due à la persistance et à l'accumulation de substances toxiques telles que les biphényles polychlorés (PCB).

(Bare, 2012) précise que le réchauffement climatique correspond à une augmentation moyenne de la température de l'atmosphère près de la surface terrestre et dans la troposphère. L'acidification quant à elle correspond à l'augmentation de la concentration d'ions d'hydrogène (H^+) dans un environnement local.

Enfin, (Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis, 2008) définit l'eutrophisation comme étant « l'enrichissement d'un écosystème aquatique en nutriments (nitrates, phosphates) qui accélèrent la productivité biologique et entraînent une accumulation indésirable de biomasse algale ».

Le calcul des CI dans TRACI 2.1 sans tenir compte de la localisation est donnée par (2.6).

$$I^i = \sum_{xm} CF_{xm}^i \times M_{xm} \quad (2.6)$$

Puisque toutes les CI permettent une caractérisation non spécifique au site, des facteurs de caractérisation génériques peuvent être utilisés. Tel que I est l'impact potentiel total de tous les produits chimiques « x » pour une CI spécifique « i ». CF est le facteur de caractérisation du produit chimique « x » émis dans le milieu « m » pour la CI « i » et traduit les émissions en impacts potentiels et M est la masse du produit chimique « x » émis dans le milieu « m » (Bare, 2012).

Le deuxième outil appliqué ReCiPe 2016, est une méthode standardisée qui utilise des indicateurs de catégorie harmonisés aux niveaux *Midpoint* et *Endpoint* et qui inclut 18 CI au niveau *Midpoint* visant à modéliser les dommages *Endpoint* dans trois domaines de protection : les dommages à la santé humaine, à la qualité des écosystèmes et aux ressources naturelles (Voir Tableau 2.8).

Tableau 2.8 Classification des catégories de dommage dans ReCiPe 2016
Tiré de Huijbregts et al. (2016)

| Zone de protection | <i>Endpoint</i> | Abréviation | Nom | Unité |
|---------------------------|--|--------------------|--|------------------------|
| Santé humaine | Dommages à la santé humaine | HH | Perte d'années de vie ajustées sur l'incapacité <i>(Disability adjusted loss of life years)</i> | année <i>(DALY)</i> |
| Environnement naturel | Dommages à la qualité des écosystèmes | ED | Perte d'espèces intégrée dans le temps | espèces.an |
| Rareté des ressources | Dommages à la disponibilité des ressources | RS | Coût supplémentaire | USD2013 |

Autres que les *CI Midpoint* apportées par TRACI 2.1, ReCiPe 2016 fournit également des évaluations de l'occupation des terres, de la transformation des terres naturelles, de l'épuisement des ressources et des radiations ionisantes provenant de la désintégration des radionucléides (Voir Tableau 2.9).

Tableau 2.9 Classification des CI dans ReCiPe 2016 et TRACI 2.1
Tiré de Chu (2019)

| ReCiPe 2016 | TRACI 2.1 |
|--|--|
| Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq) | Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq) |
| Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq) | Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq) |
| Formation d'oxydants photochimiques (kg NO _x eq) | Brouillard photochimique (kg O ₃ eq) |
| Eutrophisation des eaux douces (kg P eq) | Eutrophisation (kg N eq) |
| Eutrophisation marine (kg N eq) | |
| Acidification terrestre (kg SO ₂ eq) | Acidification (kg SO ₂ eq) |
| Toxicité cancérogène humaine (kg 1,4-DCB eq) | Cancérogénicité (CTUh) |
| Toxicité non cancérogène humaine (kg 1,4-DCB) | Non-cancérogénicité (CTUh) |
| Écotoxicité terrestre (kg 1,4-DCB) | Écotoxicité (CTUe) |
| Écotoxicité des eaux douces (kg 1,4-DCB) | |
| Écotoxicité marine (kg 1,4-DCB) | |
| Formation de particules (kg PM _{2,5} eq) | Effets respiratoires (kg PM _{2,5} eq) |
| Épuisement des combustibles fossiles (kg équivalent pétrole) | Épuisement des combustibles fossiles (MJ surplus) |
| Utilisation des terres (m ² a crop eq) | |
| Rareté des ressources minérales (kg Cu eq) | |
| Consommation d'eau (m ³) | |
| Formation d'ozone, écosystèmes terrestres (kg NO _x eq) | |
| Rayonnement ionisant (kBq Co-60 eq) | |

Le calcul des CI dans ReCiPe 2016 pour les méthodes *Midpoint* se fait suivant l'équation (2.7), tel que le facteur de caractérisation correspondant est le rapport entre l'indicateur apporté par une substance « x » à une CI donné « c » et celui apporté par une substance de référence « y » à la même CI. Le facteur de caractérisation est donc un nombre sans dimension exprimant la force d'une quantité d'une substance par rapport à celle de la substance de référence.

$$CFm_{x,c} = \frac{I_{x,c}}{I_{y,c}} \quad (2.7)$$

Par exemple, pour la CI de réchauffement climatique « c », le facteur de caractérisation s'exprime en kg CO₂ par kg de substance « x », soit le rapport entre l'indicateur, qui est dans ce cas l'augmentation du forçage radiatif infrarouge exprimé en W-année/m², apportée par un kg de substance « x » et le même indicateur exprimé par la même unité W-année/m², apportée par un kg de substance CO₂ définit comme « y ».

Le calcul des indicateurs correspondants aux CI est propre à chacune d'entre elles et varie aussi d'une méthode à une autre.

Le passage des CI *Midpoint* « c » aux catégories de dommages « a » *Endpoint* est donné par (2.8).

$$CFe_{x,c,a} = CFm_{x,c} \times F_{M \rightarrow E,c,a} \quad (2.8)$$

Les facteurs de caractérisation d'impact final CFe sont directement dérivés des CFm, avec un facteur de conversion constant F du point intermédiaire « M » au point final « E » pour chaque CI. Ces facteurs de conversion prennent en compte la perspective culturelle « c » et la zone de protection « a ». Ils restent constants par CI, car les mécanismes environnementaux sont considérés comme identiques pour tous les agents stressants « x » après le point d'impact intermédiaire sur la voie de cause à effet (Huijbregts et al., 2016).

Dans l'exemple précédent pour la CI de réchauffement climatique « c », le facteur de conversion F du point intermédiaire au point final est exprimé en années/kg CO₂ pour la zone

de protection « a » de santé humaine et en espèces.an/kg CO₂ pour la zone de protection « a » d'environnement naturel.

Une comparaison des IE entre la PACG étudiée et une pompe à chaleur conventionnelle air-air est ensuite réalisée en prenant en considération les données d'inventaire de phase de production et d'installation de celle-ci ainsi que la consommation d'électricité durant la phase d'exploitation annuelle.

Comme pour la PACG, l'étude de (Violante et al., 2022) a été prise en compte pour le calcul des matériaux et d'énergie nécessaires à la phase de fabrication (Voir Tableau 2.10).

Tableau 2.10 Données d'inventaire pour l'ACV
de la phase de production et d'installation de la PACA

| Phase | Étape / Composant | Entrée | Unité | Quantité (Violante et al., 2022) |
|---|---|---------------------------|-------|--|
| Production et installation de la PACA | Assemblage | Électricité | kWh | 894 |
| | | Gaz naturel | MWh | 2,5 |
| | Boîtier et compresseur | Acier d'armature | kg | 767 |
| | Évaporateur et condenseur | Acier faiblement allié | kg | 204 |
| | Câblage, tuyauterie et valve d'expansion | Cuivre | kg | 224 |
| | Isolation des câbles | PVC | kg | 10 |
| | Isolation des tuyaux | Élastomère | kg | 102 |
| | Ventilateur | Cuivre | kg | 9 |

Le fluide réfrigérant utilisé est le R32, il n'est pas pris en compte dans cette analyse puisque son potentiel de réchauffement global qui représente 675 est relativement faible.

En se basant sur un COP saisonnier en chauffage de 4,05 et une efficacité énergétique saisonnière en climatisation de 6,13, l'énergie électrique totale calculée, en fonction des charges horaires, est équivalente à 26 MWh (Voir Tableau 2.11) (ANNEXE IIX).

Tableau 2.11 Données d'inventaire pour l'ACV
de la phase d'exploitation annuelle de la PACA

| Phase | Entrée | Unité | Quantité |
|-----------------------|-----------------------------------|-------|----------|
| Exploitation annuelle | Électricité pour le chauffage | kWh | 21 517 |
| | Électricité pour la climatisation | kWh | 5 116 |

Enfin, comme pour la PACG seules les sorties vers la technosphère sont considérées pour la phase de fin de vie. Elles incluent notamment l'acier d'armature, l'acier faiblement allié, le cuivre, le PVC et l'élastomère (Voir Tableau 2.12).

Tableau 2.12 Données d'inventaire pour l'ACV
de la phase de fin de vie de la PACA

| Phase | Entrée | Unité | Traitement | Quantité |
|------------|------------------------|----------------------------------|------------|----------|
| Fin de vie | Acier faiblement allié | Élimination finale | kg | 204 |
| | Cuivre | Décharge sanitaire | kg | 233 |
| | PVC | Incinération Eaux usées | kg | 10 |
| | Élastomère | Décharge sanitaire Eaux usées | kg | 102 |

CHAPITRE 3

RÉSULTATS, INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, une étude approfondie des IE est réalisée en utilisant la méthode TRACI 2.1 *Midpoint*. Tout d'abord, la contribution des processus est évaluée pour identifier les éléments les plus déterminants dans l'analyse environnementale. Ensuite, une étape de normalisation permettra de mettre les résultats en perspective avec des valeurs de référence. Par la suite, des diagrammes de Sankey sont présentés pour visualiser les flux d'énergie et de matériaux.

Afin de garantir la rigueur de l'analyse, un contrôle de qualité est mené, comprenant une évaluation des IE avec les méthodes TRACI 2.1 *Midpoint* et ReCiPe 2016 *Midpoint et Endpoint*, ainsi qu'une comparaison des résultats obtenus avec des recherches antérieures.

Une analyse d'incertitude est ensuite effectuée pour évaluer la robustesse des données d'inventaire et des résultats obtenus. Cette analyse inclue une étude de sensibilité qui compare les IE du système étudié avec ceux d'une pompe à chaleur air-air dans deux contextes géographiques : le Québec et l'Alberta.

Enfin, une discussion approfondie permet de synthétiser les résultats et de tirer des conclusions sur les implications environnementales des technologies analysées.

3.1 Étude des IE avec TRACI 2.1 *Midpoint*

Les données d'inventaires recueillis permettent de réaliser une première analyse de l'ensemble du système géothermique en prenant en compte les trois étapes du cycle de vie de l'installation.

3.1.1 Contribution des processus

Le calcul effectué dans un premier temps suivant la méthode *Midpoint* TRACI 2.1 donne les résultats du Tableau 3.1 qui montrent que sur les neuf CI sur dix, la phase de production et d'installation est celle qui contribue le plus avec 99,81% de l'appauvrissement de la couche

d'ozone et 95,41% de l'épuisement des combustibles fossiles. La phase d'exploitation annuelle a l'impact le plus élevé d'écotoxicité qui égal à 43,67% et celle de fin de vie a un impact significatif de substances cancérogènes équivalent à 32,03%.

Cette analyse permet de comparer la contribution de chaque phase pour différentes CI, par exemple pour le réchauffement climatique 76,87% constituent la part de la phase de production et installation, 22,19% celle de l'exploitation annuelle et seulement 0,94% pour la fin de vie. Mais cela ne reflète pas une évaluation claire du niveau des valeurs.

3.1.2 Normalisation

La normalisation indique dans quelle mesure les résultats des CI ont une valeur relativement faible ou élevée par rapport à une référence, en divisant chaque valeur par la charge environnementale moyenne annuelle dans un pays ou un continent, divisée par le nombre d'habitants. Ce qui nous permet d'avoir la même unité pour toutes les CI, facilitant ainsi leur comparaison (Database & Support team at PRé Sustainability, 2024, p. 6).

(Ryberg, Vieira, Zgola, Bare, & Rosenbaum, 2013) proposent des facteurs de normalisation pour toutes les CI incluses dans TRACI 2.1 calculés en utilisant les inventaires des États-Unis (2008) et des États-Unis-Canada (2005/2008). Ils sont présentés comme l'IE potentiel total des zones géographiques par an, ainsi que comme l'impact en années-personnes.

Tableau 3.1 Contribution des phases de vie du système géothermique pour différentes CI

| CI | Unité | Total | 01-Production & Installation-PACG | | 02-Exploitation- annuelle-PACG | | 03-Fin-de-vie- PACG | |
|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|------------------------|--------|
| | | | | | | | | |
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11 eq | $2,2 \times 10^{-2}$ | $2,2 \times 10^{-2}$ | 99,81% | $3,45 \times 10^{-5}$ | 0,16% | $6,62 \times 10^{-6}$ | 0,03% |
| Réchauffement climatique | kg CO ₂ eq | $5,33 \times 10^4$ | $4,1 \times 10^4$ | 76,87% | $1,18 \times 10^4$ | 22,19% | $4,99 \times 10^2$ | 0,94% |
| Brouillard photochimique | kg O ₃ eq | $2,79 \times 10^3$ | $2,44 \times 10^3$ | 87,44% | $3,37 \times 10^2$ | 12,08% | 13,3 | 0,48% |
| Acidification | kg SO ₂ eq | $2,28 \times 10^2$ | $1,97 \times 10^2$ | 86,62% | 29,1 | 12,79% | 1,35 | 0,59% |
| Eutrophisation | kg N eq | $1,63 \times 10^2$ | $1,4 \times 10^2$ | 86,02% | 16,2 | 9,95% | 6,58 | 4,03% |
| Cancérogènes | CTUh | $3,67 \times 10^{-2}$ | $1,65 \times 10^{-2}$ | 44,86% | $8,48 \times 10^{-3}$ | 23,11% | $1,17 \times 10^{-2}$ | 32,03% |
| Non cancérigènes | CTUh | $2,08 \times 10^{-2}$ | $1,18 \times 10^{-2}$ | 56,49% | $3,19 \times 10^{-3}$ | 15,32% | $5,87 \times 10^{-3}$ | 28,19% |
| Effets respiratoires | kg PM _{2,5} eq | 33,3 | 28,7 | 86,43% | 4,31 | 12,97% | 0,198 | 0,60% |
| Écotoxicité | CTUe | $1,99 \times 10^6$ | $8,44 \times 10^5$ | 42,32% | $8,71 \times 10^5$ | 43,67% | $2,79 \times 10^5$ | 14,01% |
| Épuisement des combustibles fossiles | MJ surplus | $7,92 \times 10^4$ | $7,55 \times 10^4$ | 95,41% | $3,12 \times 10^3$ | 3,94% | $5,18 \times 10^2$ | 0,65% |

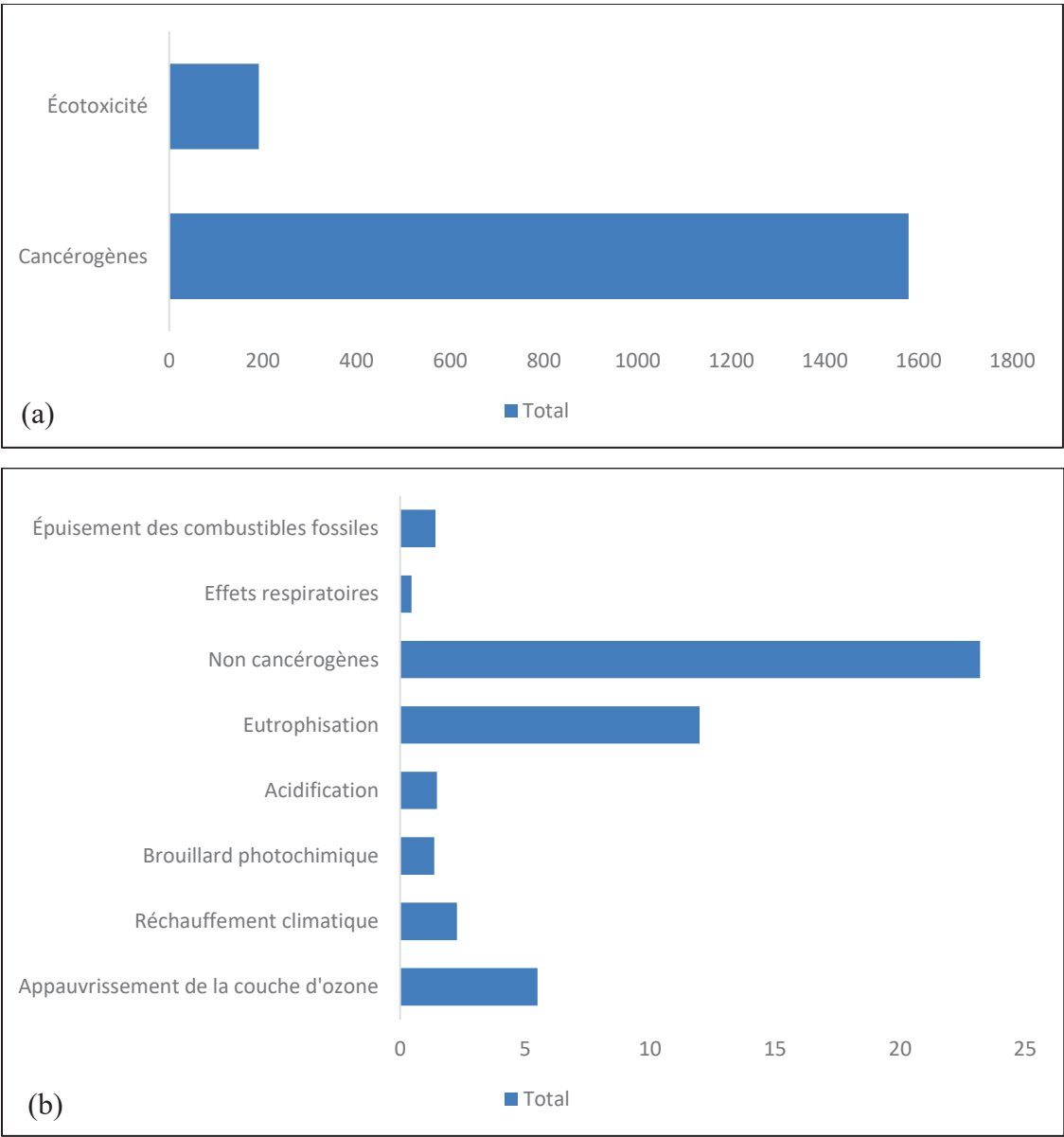


Figure 3.1 Normalisation des CI
(a) Écotoxicité et cancérrogènes (b) Autres

Les résultats de la normalisation (Voir Figure 3.1) montrent que les substances cancérrogènes représentent la CI la plus élevée avec une contribution égale à 1 579 fois supérieure à celui causé par une personne par an, suivie par l'écotoxicité qui représente 191 fois l'impact causé par une personne par an.

Pour bien comprendre l'origine de ces résultats, la contribution par phase est d'abord calculée (Voir Figure 3.2). Ce qui donne les valeurs les plus élevées égale à 708 impact/personne-an de substances cancérogènes de la phase de production et installation et 83 impact/personne-an d'écotoxicité de la phase d'exploitation annuelle.

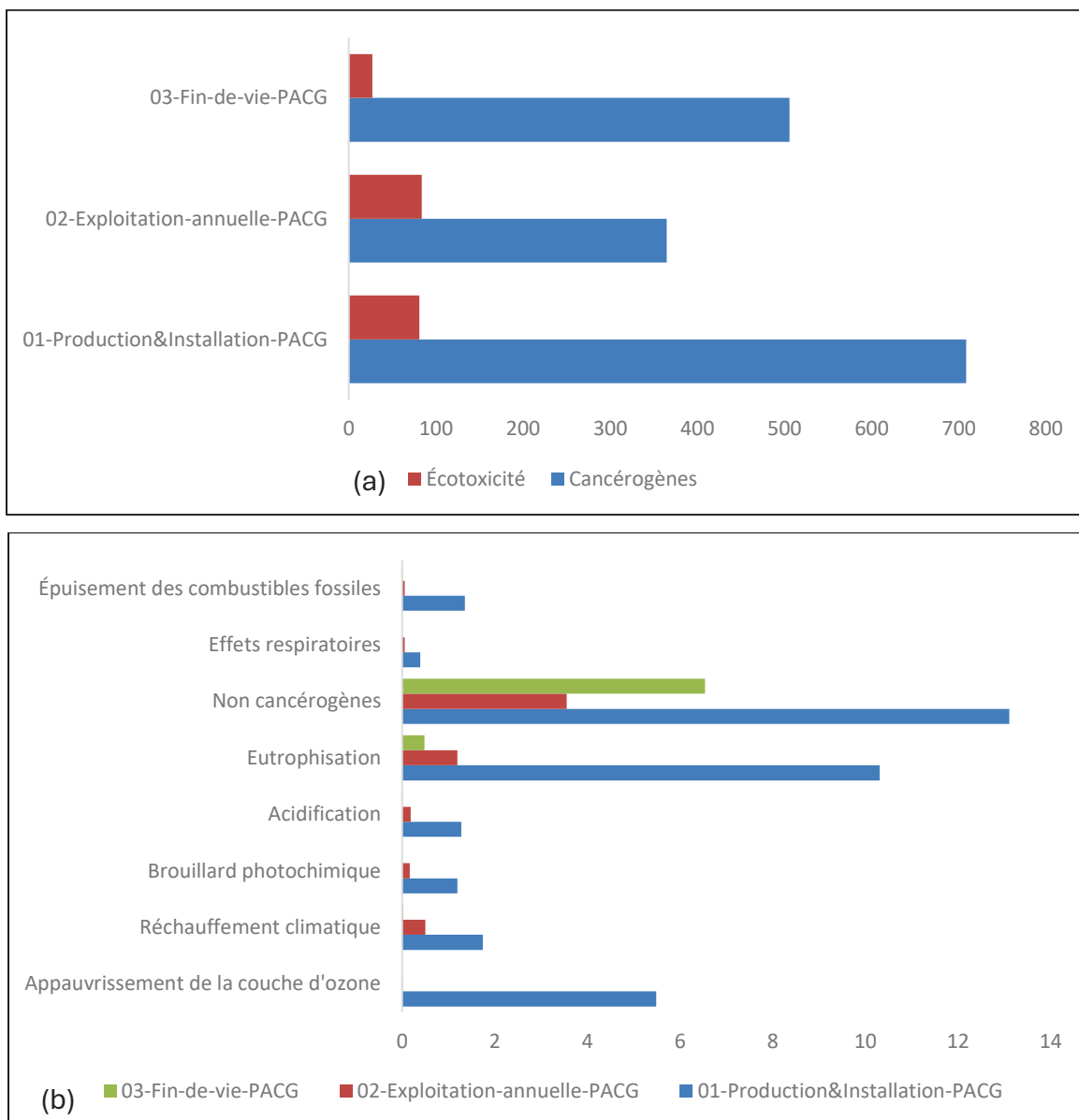


Figure 3.2 Normalisation des CI par phase
(a) Écotoxicité et cancérogènes (b) Autres

3.1.3 Diagrammes de Sankey

Les diagrammes de Sankey sont utilisés pour visualiser les flux de matériaux et d'énergie dans de nombreuses applications, afin de mieux comprendre les pertes et les inefficacités, de cartographier les processus de production et de donner une idée de l'échelle d'un système (Lupton & Allwood, 2017).

Les diagrammes des deux phases sont alors générés pour connaître quels éléments sont la cause de ces impacts. Ils montrent que, pour la phase de production et installation (Voir Figure 3.3), la PACG possède un impact sur les substances cancérigènes de 35,3% soit 250 impact/personne-an ou encore 6×10^{-3} CTUh.

CTUh étant défini selon (Database & Support team at PRé Sustainability, 2024, p. 16), comme l'unité toxique comparative pour l'humain exprimant l'augmentation estimée de la morbidité dans la population humaine totale par unité de masse d'une substance chimique émise (cas/kg). Parmi ces 35,5% l'acier d'armature représente 24,2%, notamment à cause des procédés de fabrication tels que le four à oxygène basique et les fours électriques à arc qui peuvent émettre des substances cancérigènes, comme les oxydes de métaux lourds.

Sa part restant cependant inférieure à celle de l'échangeur géothermique qui s'élève à 64,7% soit 458 impact/personne-an ou encore 10^{-2} CTUh. La bentonite activée contribue de 43,9% et le polyéthylène de 11,4%.

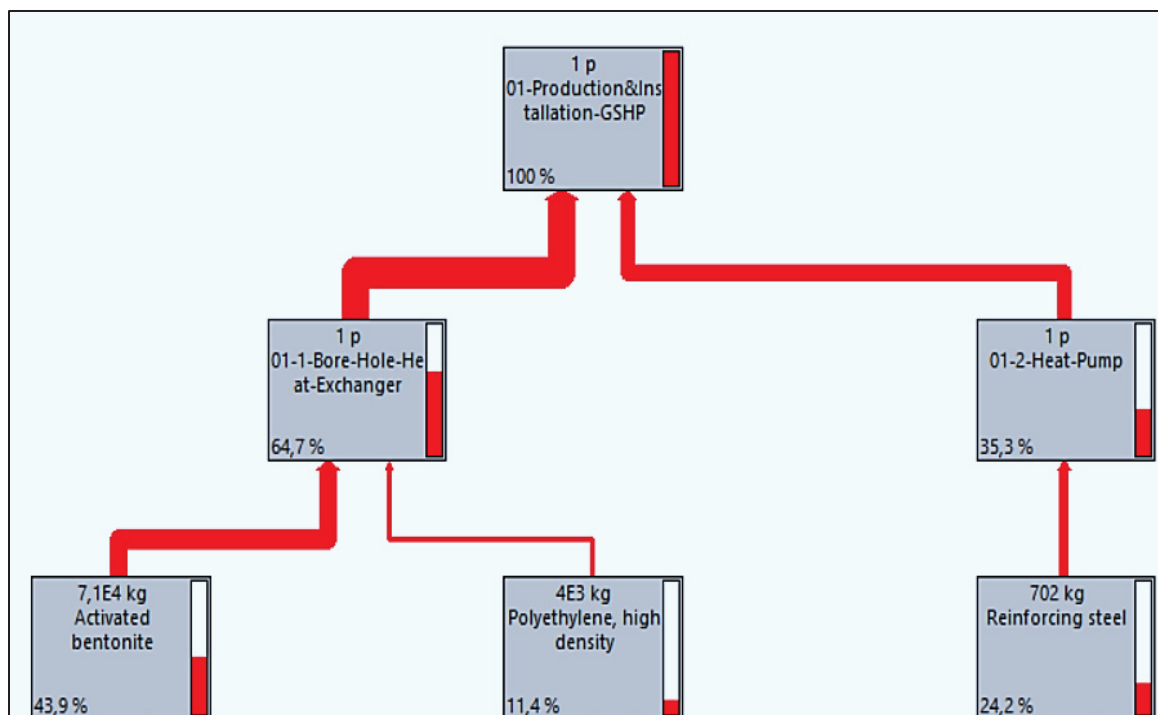


Figure 3.3 Diagramme de Sankey de la phase de production et installation pour les substances cancérogènes

Concernant la phase d'exploitation annuelle (Voir Figure 3.4), l'électricité consommée pour le chauffage représente un impact 61 impact/personne-an d'écotoxicité, celle pour la pompe à chaleur est de 17 impact/personne-an, et seulement 5 impact/personne-an pour la climatisation, soit respectivement $6,32 \times 10^5$ CTUe, $1,82 \times 10^5$ CTUe et $5,71 \times 10^4$ CTUe.

CTUe définit comme une unité toxique comparative pour les écosystèmes, exprimant une estimation de la fraction potentiellement affectée des espèces (PAF), intégrée sur le temps et le volume par unité de masse d'une substance chimique émise (PAF- m^3/kg) (Database & Support team at PRé Sustainability, 2024, p. 18).

Les impacts écotoxiques dans ce contexte proviennent principalement des matériaux et des processus nécessaires à la construction et à l'entretien des infrastructures de la centrale hydraulique.

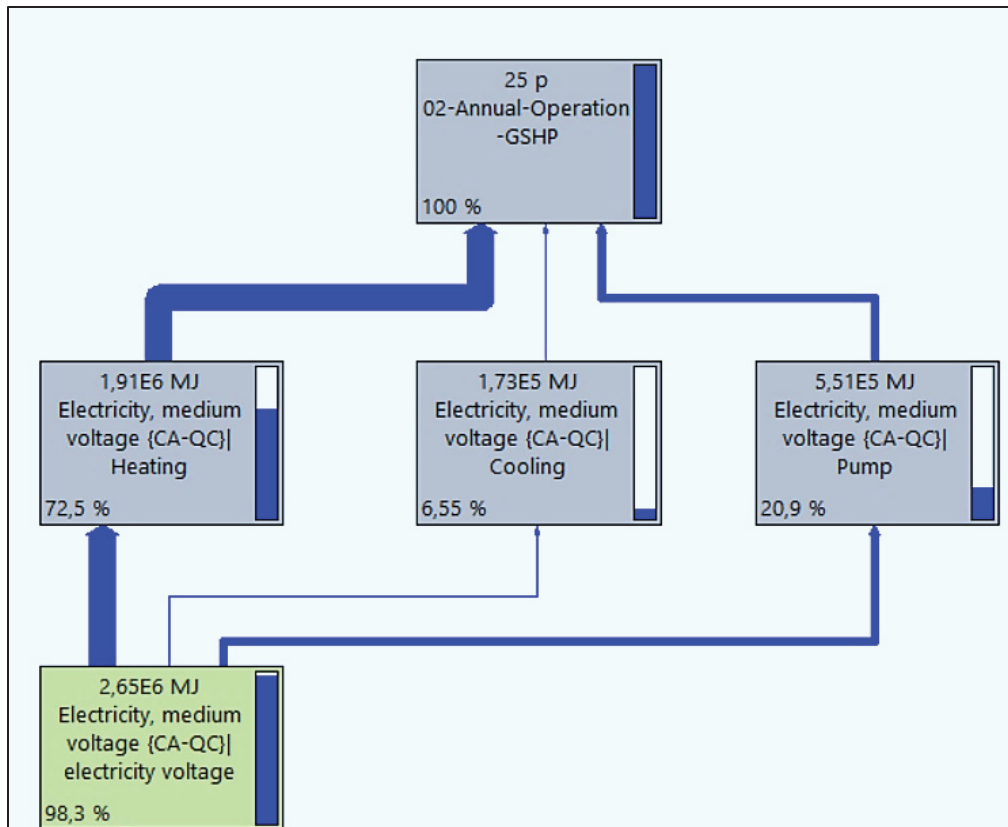


Figure 3.4 Diagramme de Sankey de la phase d'exploitation annuelle pour l'écotoxicité

3.2 Contrôle de qualité

Une deuxième analyse consiste à appliquer une autre méthode de calcul ReCiPe 2016 *Midpoint* et *Endpoint*. Le calcul est basé sur la nature d'opération par an. Les résultats sont ensuite évalués en fonction de ces deux méthodes et comparés par rapport aux études précédentes.

3.2.1 Évaluation des impacts avec les méthodes TRACI 2.1 et ReCiPe 2016 *Midpoint*

(Chu, 2019) détaille les causes de différences entre les facteurs pris en compte pour le calcul de chacune des deux méthodes, ce qui explique pourquoi pour certaines CI, les unités de mesure varient, notamment celles de l'eutrophication, la toxicité humaine, l'écotoxicité, la formation d'oxydants photochimiques et l'épuisement des combustibles fossiles, mesurées respectivement en (kg P eq) et (kg N eq), (kg 1,4-DCB eq), (kg 1,4-DCB eq), (kg NO_x eq),

(kg équivalent pétrole) dans ReCipe 2016 et en (kg N eq), (CTUe), (kg O₃ eq) et (MJ surplus) dans TRACI 2.1.

La comparaison dans la suite n'est considérée qu'entre les CI ayant les mêmes unités, soit le changement climatique (kg CO₂ eq), l'appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq), l'acidification terrestre (kg SO₂ eq), l'eutrophisation marine (kg N eq) et la formation de particules fines (kg PM_{2,5} eq).

Le Tableau 3.2 montre que les valeurs des deux méthodes convergent avec de légères variations pour le changement climatique, l'acidification terrestre et la formation de particules fines, contrairement à celles de l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'eutrophisation. Pour connaître l'origine de cet écart, la contribution des substances calculée par Simapro 9.6 pour l'eutrophisation est par exemple analysée.

Tableau 3.2 Comparaison des résultats de CI
entre ReCipe 2016 et TRACI 2.1

| CI | Unité | ReCipe 2016 | TRACI 2.1 |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Changement climatique | kg CO ₂ eq | $2,22 \times 10^3$ | $2,13 \times 10^3$ |
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11 eq | 2×10^{-3} | 9×10^{-4} |
| Acidification terrestre | kg SO ₂ eq | 7 | 9 |
| Eutrophisation | kg N eq | 6×10^{-2} | 6 |
| Formation de particules | kg PM _{2,5} eq | 3 | 1 |

D'après la Figure 3.5, on constate que les éléments pris en considération changent d'une méthode à l'autre sauf pour l'ion ammonium, le nitrate et le dioxyde d'azote. Pourtant l'apport de chacun de ces mêmes composés varie également et s'élève à 9×10^{-3} , 3×10^{-2} et 2×10^{-9} kg N eq dans ReCipe 2016 et à 2×10^{-2} , 0,11 et 6×10^{-9} kg N eq dans TRACI 2.1.

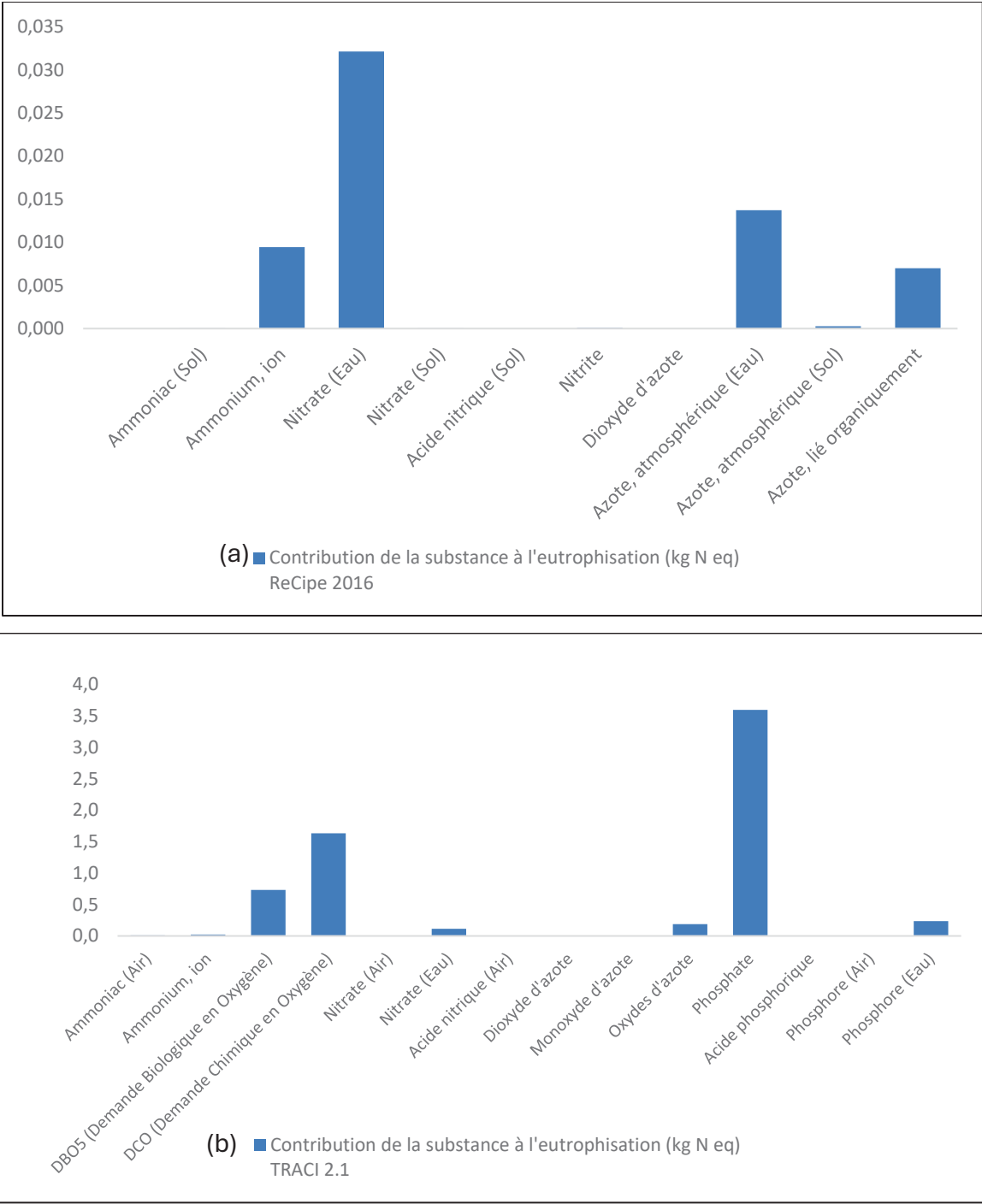


Figure 3.5 Contribution de substances à l'eutrophisation (kg N eq)
(a) ReCipe 2016 (b) TRACI 2.1

Le facteur de caractérisation étant un coefficient utilisé dans l'ACV pour quantifier l'IE d'une substance par rapport à une CI donnée. Il représente la contribution relative d'une substance à un impact spécifique et varie d'une méthode à une autre, ce qui explique cette différence de quantités.

Les résultats ne sont pas convergents en raison des différences dans les facteurs de caractérisation, qui sont spécifiques à la localisation, ainsi que des différents modèles de caractérisation adoptés par chaque méthode [...]. Pour des impacts tels que l'eutrophisation [...], qui utilisent des indicateurs différents pour des compartiments écologiques distincts en fonction de la méthode, cette comparaison quantitative n'est pas possible (Cavalett, Chagas, Seabra & Bonomi, 2012).

3.2.2 Comparaison des résultats d'inventaire avec les recherches antérieures

L'objectif de cette étude est de vérifier si les valeurs calculées se situent dans des intervalles comparables à celles obtenues lors de l'analyse du cycle de vie d'installation géothermique similaire, située à proximité de la région de Montréal.

(Smith, Bevacqua, Tembe & Lal, 2021) calculent l'IE d'un système de PACG de 10 kW fonctionnant pendant 25 ans à New Jersey.

Les résultats de leur analyse *Midpoint* effectuée avec la méthode ReCiPe 2016 (Voir Figure 3.6) démontrent une cohérence avec la majorité des valeurs obtenues par kW de puissance dans le cas d'une puissance totale de 59 kW comme mentionnée dans la section 2.3.2

Cependant, la divergence des contributions liée au rayonnement ionisant, estimé à 0,8 kBq Co-60 eq/kW dans cette étude et à 104 kBq Co-60 eq/kW dans celle de (Smith et al., 2021), ainsi qu'à la consommation d'eau évaluée à 10 m³/kW et 1,1 m³/kW respectivement, peut s'expliquer par l'origine de production de l'électricité.

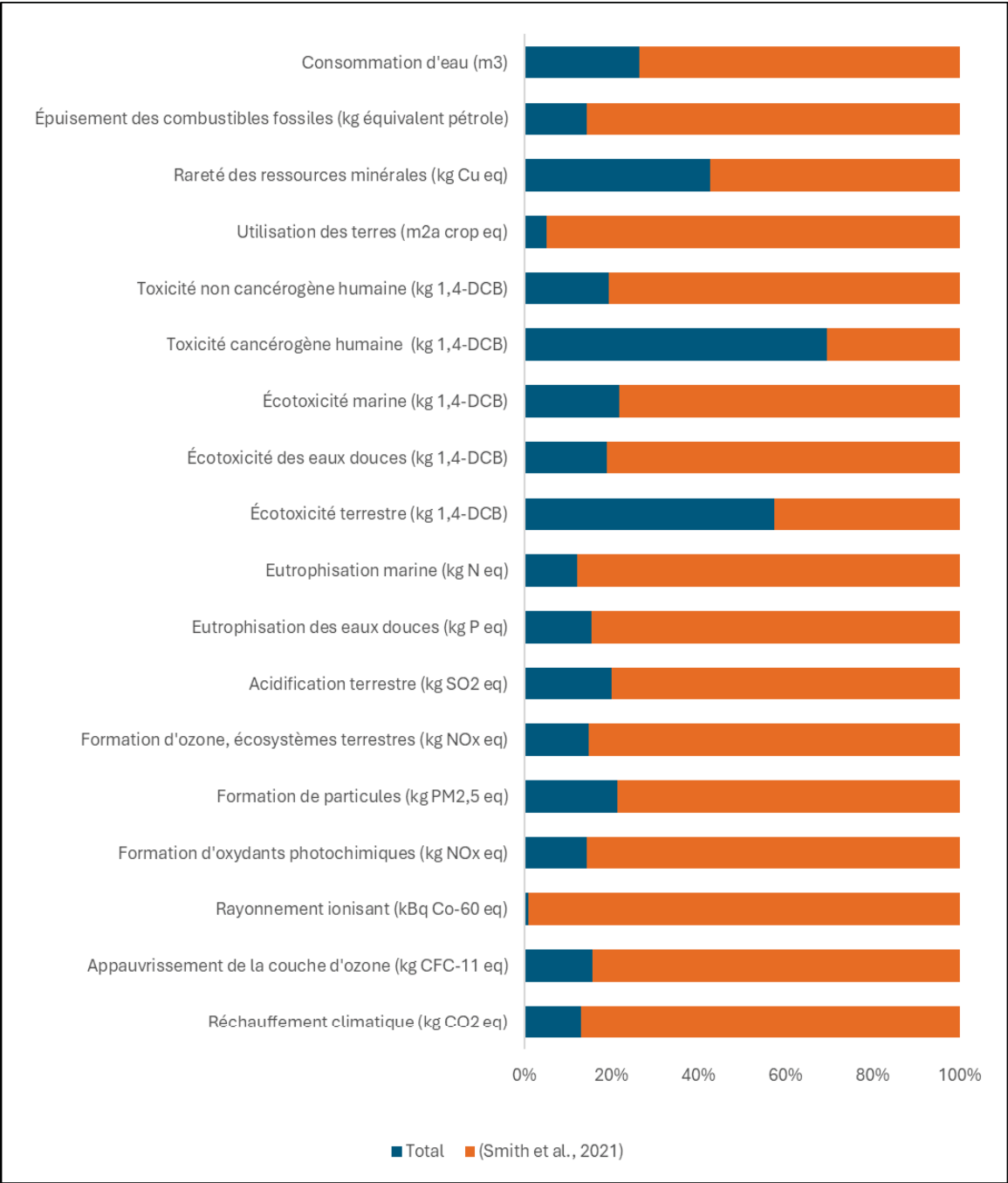


Figure 3.6 Évaluation comparative par la méthode ReCiPe 2016 *Midpoint* avec Smith et al. (2021)

En effet, (Smith et al., 2021) trouvent une valeur de 1010 kBq Co-60 eq provenant de l'exploitation en chauffage, donc de l'électricité utilisée pour alimenter les pompes à chaleur pendant l'hiver. Ils supposent que pour le New Jersey cette électricité est générée par un mix de 28,7% de charbon, 31,2% de gaz naturel et 34,5% de nucléaire alors que celle de Montréal provient seulement de la centrale hydraulique de Québec

D'autre part, le diagramme de Sankey montre que 96,3% de la consommation annuelle en électricité, dont 69,9% pour le chauffage, 20,1% pour la pompe de circulation et 6,31% pour la climatisation, contribue directement à la CI de consommation d'eau.

La Figure 3.7 montre aussi une adéquation avec la méthode *Endpoint* pour l'évaluation de dommages en DALY, *Disability Adjusted Life Years* ou encore années de vie ajustées sur l'incapacité pour la santé humaine, en USD2013 pour les ressources et en espèces.an pour les écosystèmes. Les résultats révèlent pour les catégories mentionnées des valeurs proches entre cette étude et celle de (Smith et al., 2021), tels que $1,3 \times 10^{-4}$ et $3,8 \times 10^{-4}$ DALY/kW, 4 et 16 USD2013/kW et $4,6 \times 10^{-7}$ et $1,2 \times 10^{-6}$ espèces.an/kW, respectivement.

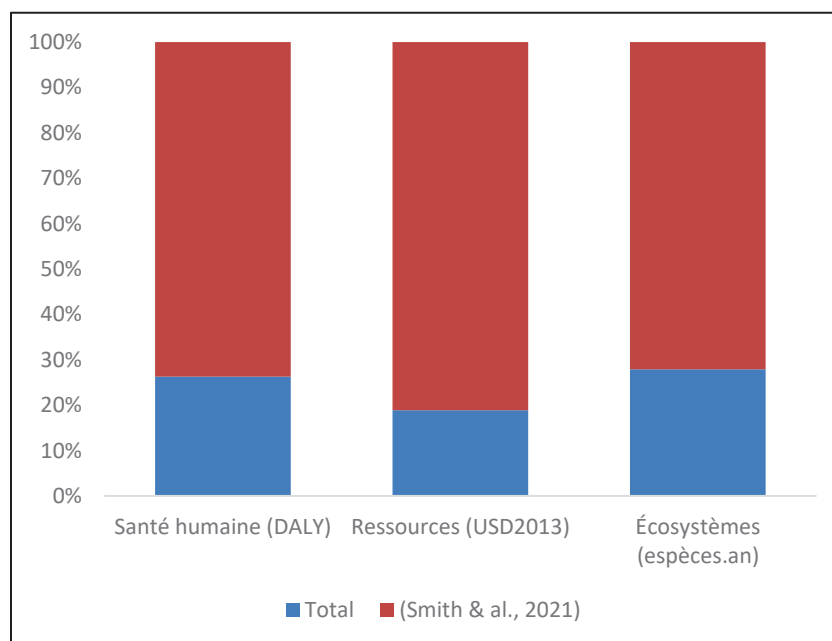


Figure 3.7 Évaluation comparative par la méthode ReCiPe 2016 *Endpoint* avec Smith et al. (2021)

3.3 Analyse d'incertitude

L'analyse d'incertitude et de sensibilité concernant divers paramètres est essentielle pour comprendre la robustesse des résultats.

Lors de la réalisation d'une ACV, des incertitudes surgissent en raison des choix et des hypothèses lors de la définition des objectifs et du champ d'application, des données d'inventaire de la phase d'inventaire, ainsi que des facteurs de caractérisation utilisés dans la phase d'évaluation des impacts.

Ces incertitudes incluent la distribution des valeurs possibles d'un paramètre, l'incertitude du modèle ainsi que la variabilité spatiale, temporelle et technologique des données.

Plusieurs méthodes appropriées ont été développées pour évaluer ou atténuer chaque type d'incertitude et de variabilité, notamment la standardisation de l'ACV, le jugement d'experts ou examinateurs indépendants, l'étude de sensibilité, l'analyse de scénarios, l'analyse de corrélation et de régression, la modélisation non linéaire, la modélisation dynamique ou spatialisée, le développement en série de Taylor, la simulation probabiliste et analyse de Monte-Carlo et enfin la comparaison des mesures et la collecte de données supplémentaires (Joliet et al., 2016).

3.3.1 Données d'inventaire

L'ACV de l'installation est ensuite réalisée en prenant en compte l'inventaire de données de (Smith et al., 2021) pour la phase de production et d'installation de la PACG. Les résultats sont ensuite comparés avec le cas de référence considérant l'étude de (Violante et al., 2022) (Voir Figure 3.8).

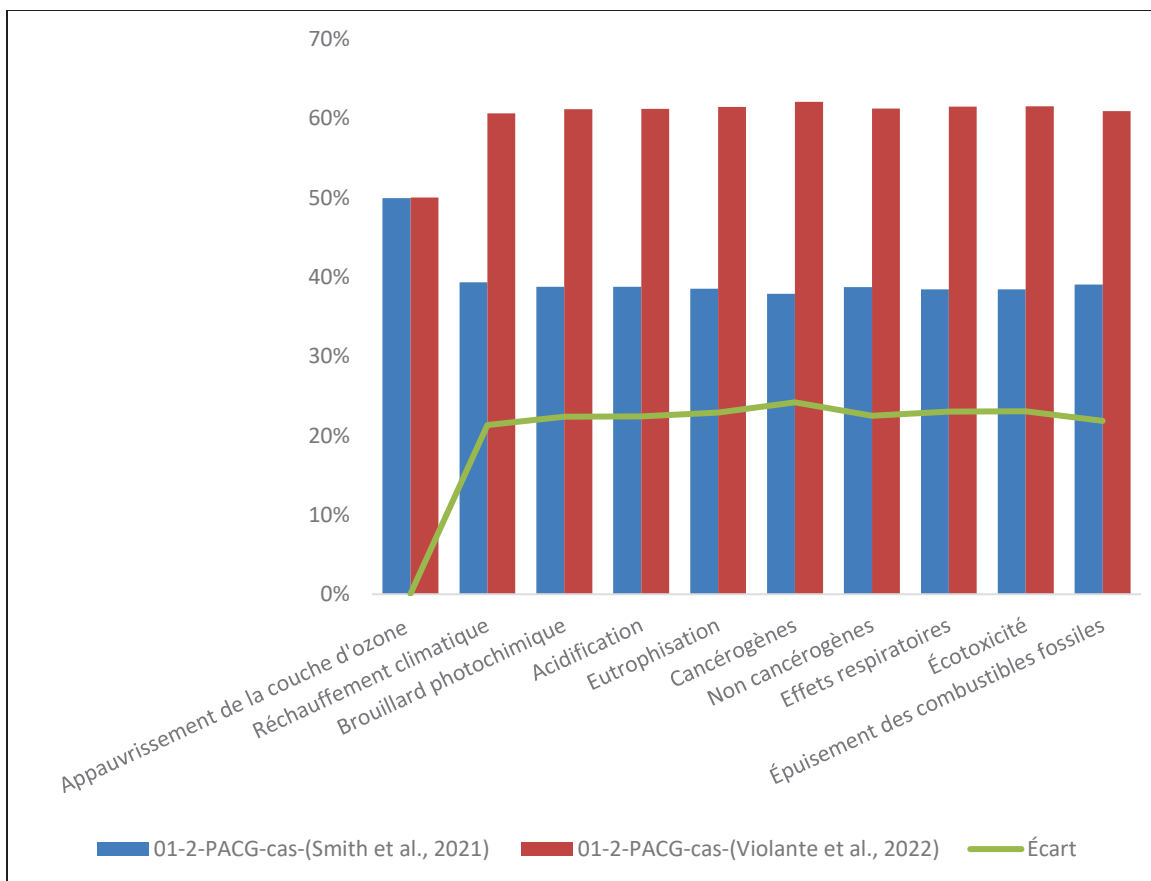


Figure 3.8 Évaluation comparative des résultats de données d'inventaire pour la PACG entre Violante et al.

(2022) et Smith et al. (2021)

Un écart de seulement 0,05% pour la catégorie d'appauvrissement de la couche d'ozone puisque la quantité de réfrigérant dans les deux cas est la même soit 18 kg de R134a.

La moyenne des écarts pour le restant des catégories est évaluée à 22,65% avec un maximum de 24,2% pour les substances cancérigènes, soit 6×10^{-3} CTHh pour le cas de (Smith et al., 2021) et 10^{-2} CTHh pour celui de (Violante et al., 2022). Ceci s'explique par le fait que 68,4% de la contribution à cette CI provient de l'acier d'armature, la quantité utilisée dans les deux cas respectivement est égale à 422 kg et 702 kg.

Le minimum est observé pour la catégorie de réchauffement climatique soit $2,74 \times 10^3$ kg CO₂ eq et $4,23 \times 10^3$ kg CO₂ eq pour les mêmes études respectivement, le cuivre étant le principal contributeur à cette CI avec 130 kg pour l'étude de (Smith et al., 2021) et 206 kg pour celle de (Violante et al., 2022).

3.3.2 Étude de sensibilité avec comparaison d'une PACA

L'objectif d'une analyse de sensibilité est de tester la robustesse des résultats et leur sensibilité aux données, aux hypothèses et aux modèles utilisés. Pour ce faire, il s'agit d'identifier les paramètres clés qui influencent le plus le résultat. (Jolliet et al., 2016).

La production de la PACG avec le fluide frigorigène cause 2×10^{-2} kg CFC-11 eq soit 5 impact/personne-an contre 5×10^{-5} kg CFC-11 eq soit $1,4 \times 10^{-2}$ impact/personne-an sans le R134a, soit 371 fois plus.

L'amélioration des coefficients de performance des pompes à chaleurs géothermiques et du rendement de la pompe de circulation d'une unité chacun, soit le COP de chauffage passant de 4,1 à 5,1, le COP de climatisation passant de 4,7 à 5,7 et le rendement de la pompe de circulation passant de 0,7 à 0,8, implique une réduction de 17,27% sur tous les IE au cours de la phase d'exploitation pendant 25 ans. Cette optimisation se traduit également par une diminution de la consommation électrique annuelle passant de 21 MWh, 2 MWh et 6 MWh à 17 MWh, 1,5 MWh et 5,5 MWh soit de 29 MWh à 24 MWh au total.

3.3.2.1 Cas au Québec

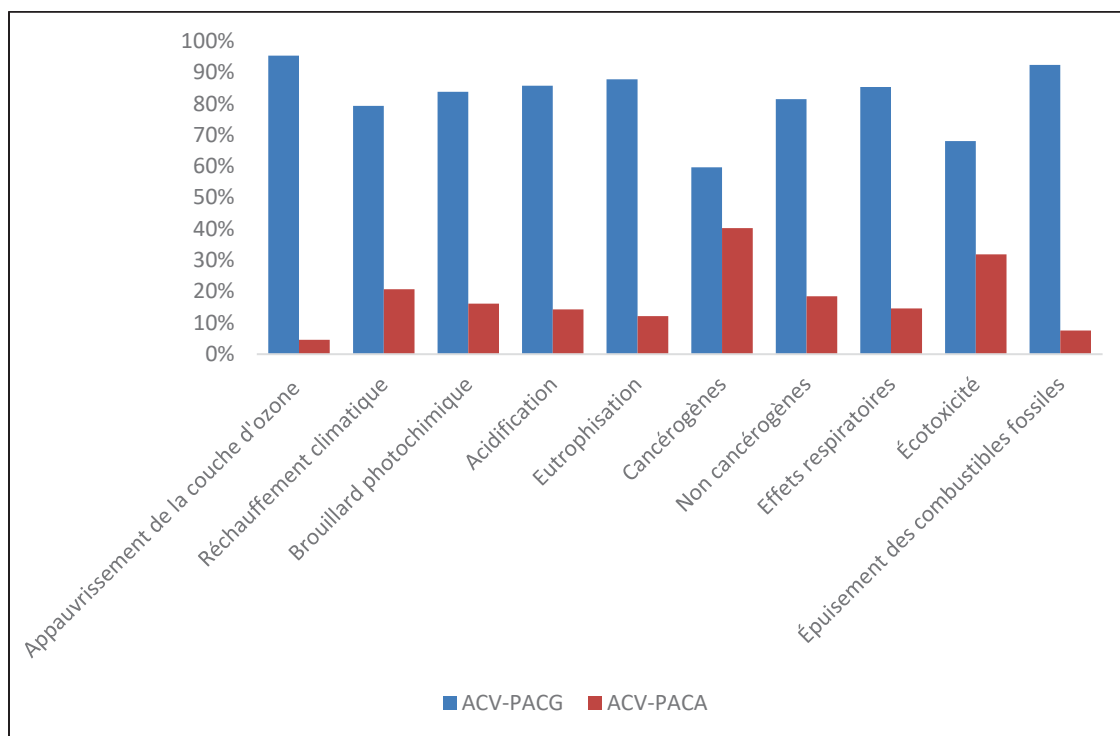


Figure 3.9 Évaluation comparative des IE avec la pompe à chaleur air-air au Québec

En considérant le cas de référence fonctionnant sans fluide frigorigène avec les coefficients de performance et le rendement de la pompe de circulation améliorés, les résultats de comparaison avec un système de pompe à chaleur air-air (Voir Figure 3.9) montrent que pour toutes les CI de l'ACV, incluant toutes les phases, le système géothermique a une contribution plus élevée que le système à source d'air. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Comparaison des résultats de CI
entre l'installation géothermique et la pompe à chaleur air-air au Québec

| CI | Unité | ACV-PACG- Québec | ACV-PACA- Québec |
|---|-------------------------|---------------------|----------------------|
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11 eq | 3×10^{-3} | $1,5 \times 10^{-4}$ |
| Réchauffement climatique | kg CO ₂ eq | $7,87 \times 10^4$ | $2,06 \times 10^4$ |
| Brouillard photochimique | kg O ₃ eq | $4,47 \times 10^3$ | $8,63 \times 10^2$ |
| Acidification | kg SO ₂ eq | $4,3 \times 10^2$ | 71,5 |
| Eutrophisation | kg N eq | $3,1 \times 10^2$ | 43 |
| Cancérogènes | CTUh | 5×10^{-2} | 3×10^{-2} |
| Non cancérogènes | CTUh | 4×10^{-2} | 9×10^{-3} |
| Effets respiratoires | kg PM _{2,5} eq | 66,8 | 11,5 |
| Écotoxicité | CTUe | $3,75 \times 10^6$ | $1,76 \times 10^6$ |
| Épuisement des combustibles fossiles | MJ surplus | $1,45 \times 10^5$ | $1,18 \times 10^4$ |

L'exploitation annuelle en chauffage et climatisation représente la cause d'IE principale pour le système de pompe à chaleur air-air dans presque toutes les catégories, à l'exception de celle liée aux substances cancérogènes et l'eutrophisation. En revanche, pour l'installation géothermique, c'est la phase de production et d'installation qui génère l'IE le plus significatif, comme mentionné précédemment (Voir Figure 3.10).

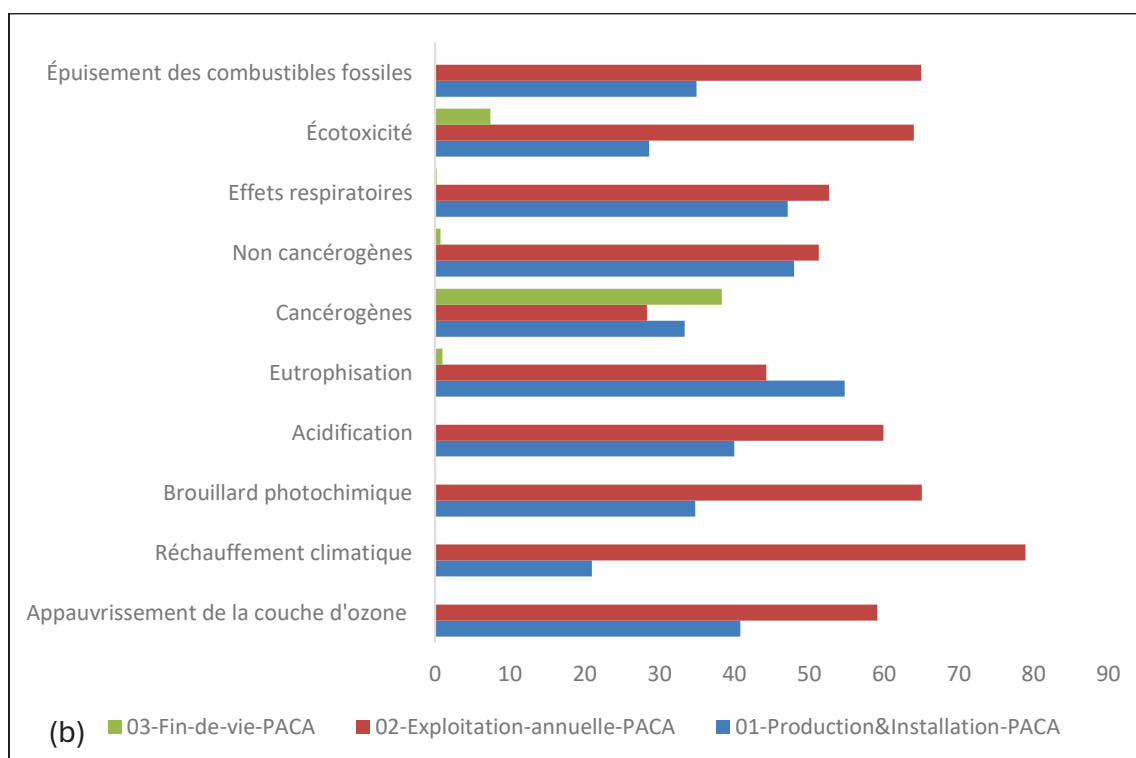
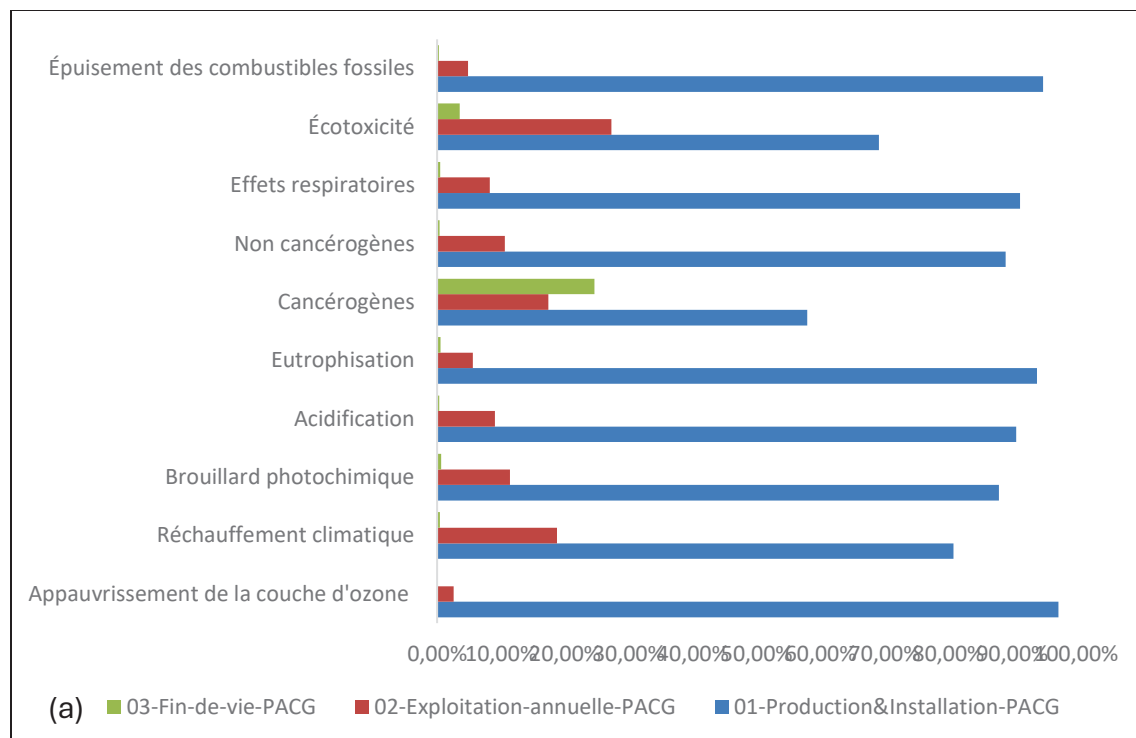


Figure 3.10 Contribution des phases de cycle de vie sur les CI au Québec
(a) Installation géothermique (b) Pompe à chaleur air-air

En effet, bien que le système à source d'air présente une consommation électrique annuelle plus élevée que le système géothermique, soit 26 MWh contre 24 MWh, et que la production de la pompe à chaleur de celui-ci engendre un IE environ 5% supérieur à celui de la PACG dans toutes les catégories (Voir Tableau 3.4), la fabrication et la mise en place de l'échangeur géothermique représentent la contribution la plus significative aux différentes CI, avec la bentonite activée identifiée comme le principal facteur responsable de ces contributions avec une moyenne de 72% (Voir Figure 3.11).

Tableau 3.4 Comparaison des résultats de CI de la phase de production et installation entre la PACG et la PACA au Québec

| CI | Unité | Pompe-à-chaleur-géothermique | Pompe-à-chaleur-air-air |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11 eq | 5×10^{-5} | 6×10^{-5} |
| Réchauffement climatique | kg CO ₂ eq | $3,88 \times 10^3$ | $4,31 \times 10^3$ |
| Brouillard photochimique | kg O ₃ eq | $2,69 \times 10^2$ | 3×10^2 |
| Acidification | kg SO ₂ eq | 25,6 | 28,6 |
| Eutrophisation | kg N eq | 21 | 23,5 |
| Cancérogènes | CTUh | 10^{-2} | $1,1 \times 10^{-2}$ |
| Non cancérogènes | CTUh | 4×10^{-3} | $4,5 \times 10^{-3}$ |
| Effets respiratoires | kg PM _{2,5} eq | 4,8 | 5,4 |
| Écotoxicité | CTUe | $4,49 \times 10^5$ | $5,02 \times 10^5$ |
| Épuisement des combustibles fossiles | MJ surplus | $3,71 \times 10^3$ | $4,14 \times 10^3$ |

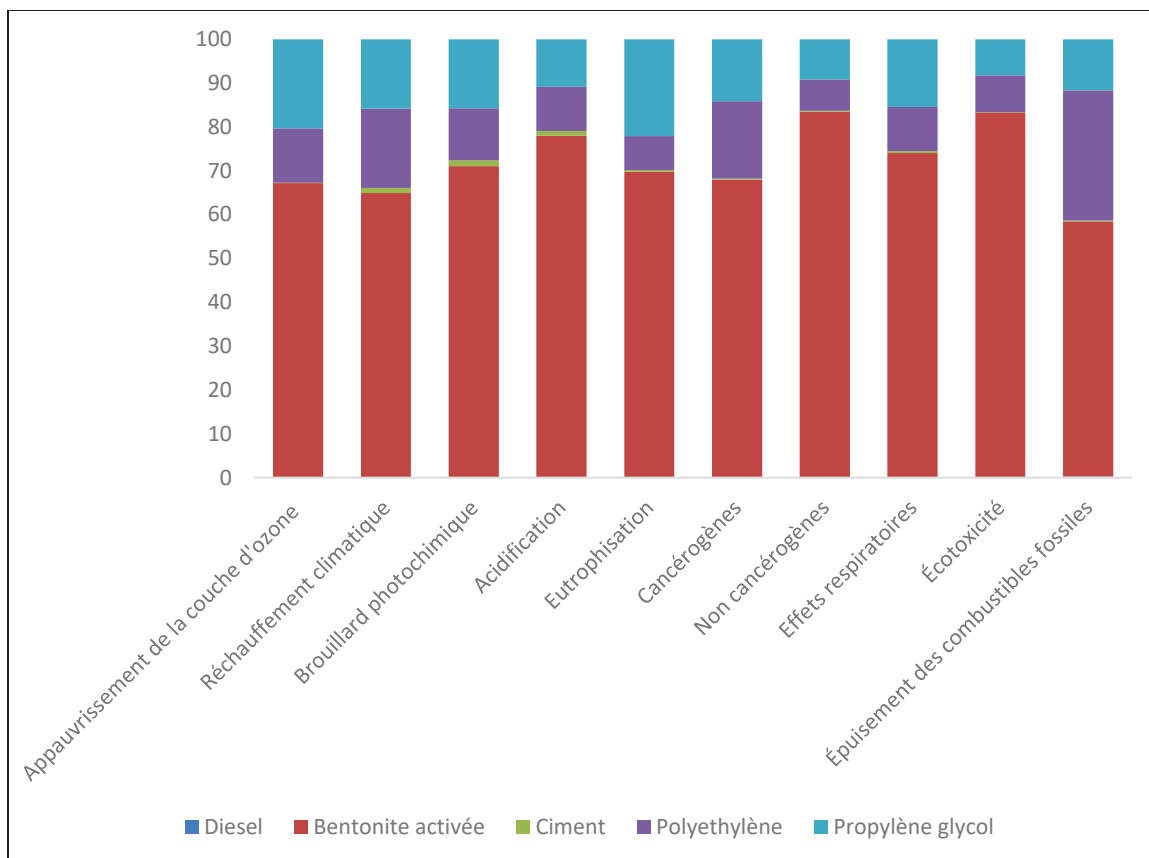


Figure 3.11 Contribution de la phase de production et installation de la PACG sur les CI au Québec

3.3.2.2 Cas en Alberta

Une dernière étude consiste à envisager une centrale électrique située en Alberta, utilisant le gaz naturel comme source d'énergie et de comparer les résultats d'un système géothermique en tenant compte de la consommation énergétique de la pompe de circulation ainsi que d'un scénario sans cette considération, avec ceux d'une PACA, dans le but de connaître l'influence du mix d'électricité sur les IE (Voir Figure 3.12).

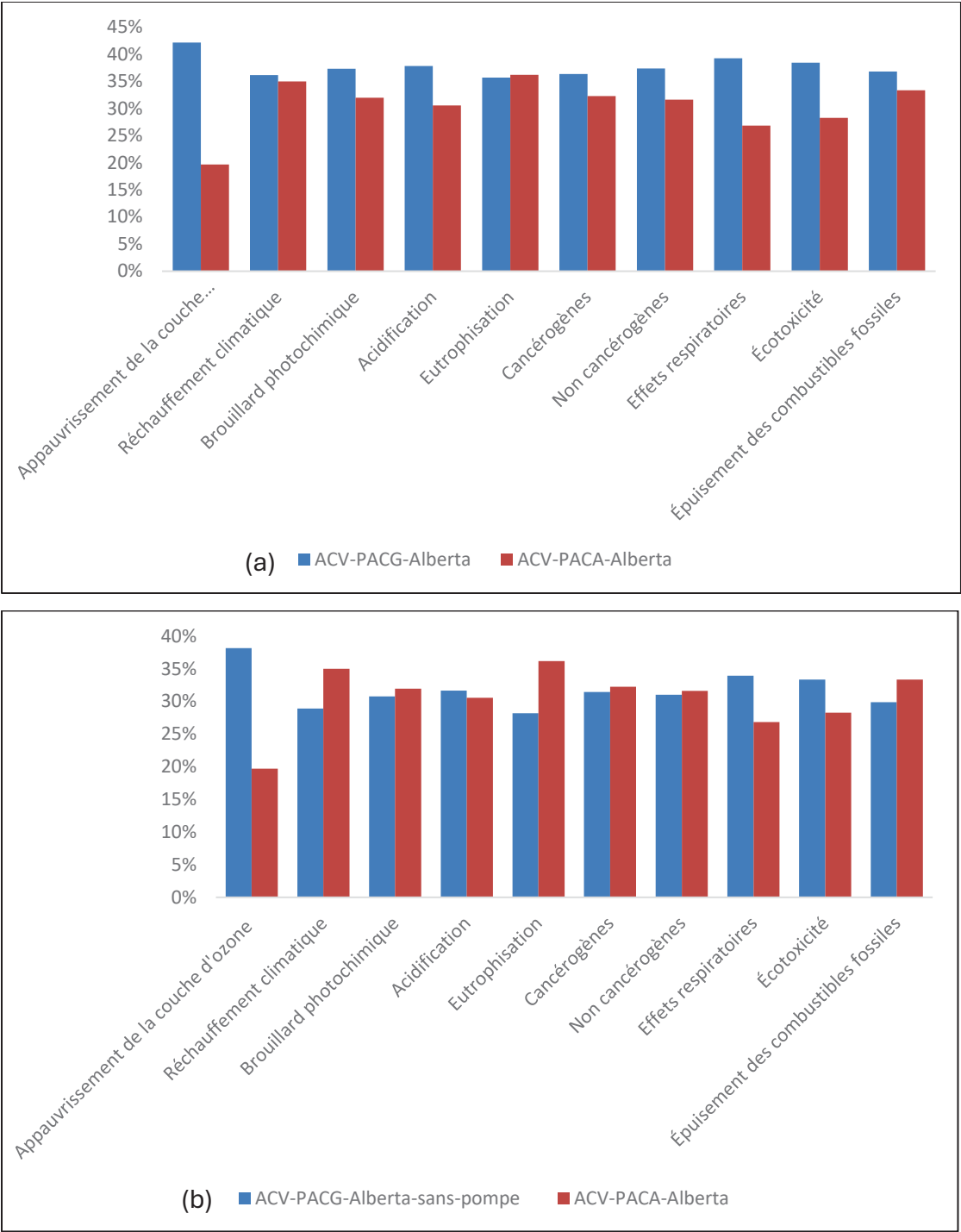


Figure 3.12 Évaluation comparative des IE
avec la pompe à chaleur air-air en Alberta
(a) Avec pompe de circulation (b) Sans pompe de circulation

L'ACV incluant toutes les phases montre que pour toutes les catégories, sauf celle liée à l'eutrophisation, le système géothermique possède aussi un plus grand impact que celui de la pompe à chaleur air-air, dans le cas où on prend en compte le fonctionnement de la pompe de circulation.

Cependant, si cette même pompe est exclue de l'étude les résultats démontrent que le système à source d'air engendre un impact légèrement plus important lié à six catégories sur dix notamment pour le réchauffement climatique, le brouillard photochimique, l'eutrophisation, les substances cancérigènes et non cancérigènes et l'épuisement du combustible fossile (Voir Tableau 3.5).

Tableau 3.5 Comparaison des résultats de CI
entre la PACG et la pompe à chaleur air-air en Alberta

| CI | Unité | ACV-PACG- Alberta | ACV-PACG- Alberta- sans-pompe | ACV-PACA- Alberta |
|---|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11 eq | $5,2 \times 10^{-3}$ | $4,7 \times 10^{-3}$ | $2,4 \times 10^{-3}$ |
| Réchauffement climatique | kg CO ₂ eq | $5,05 \times 10^5$ | $4,04 \times 10^5$ | $4,89 \times 10^5$ |
| Brouillard photochimique | kg O ₃ eq | $1,67 \times 10^4$ | $1,38 \times 10^4$ | $1,43 \times 10^4$ |
| Acidification | kg SO ₂ eq | $1,37 \times 10^3$ | $1,15 \times 10^3$ | $1,11 \times 10^3$ |
| Eutrophisation | kg N eq | $3,53 \times 10^3$ | $2,79 \times 10^3$ | $3,58 \times 10^3$ |
| Cancérogènes | CTUh | $9,74 \times 10^{-2}$ | $8,43 \times 10^{-2}$ | $8,65 \times 10^{-2}$ |
| Non cancérogènes | CTUh | 0,14 | 0,118 | 0,12 |
| Effets respiratoires | kg PM _{2,5} eq | $1,49 \times 10^2$ | $1,29 \times 10^2$ | $1,02 \times 10^2$ |
| Écotoxicité | CTUe | $6,49 \times 10^6$ | $5,63 \times 10^6$ | $4,78 \times 10^6$ |
| Épuisement des combustibles fossiles | MJ surplus | $7,66 \times 10^5$ | $6,22 \times 10^5$ | $6,94 \times 10^5$ |

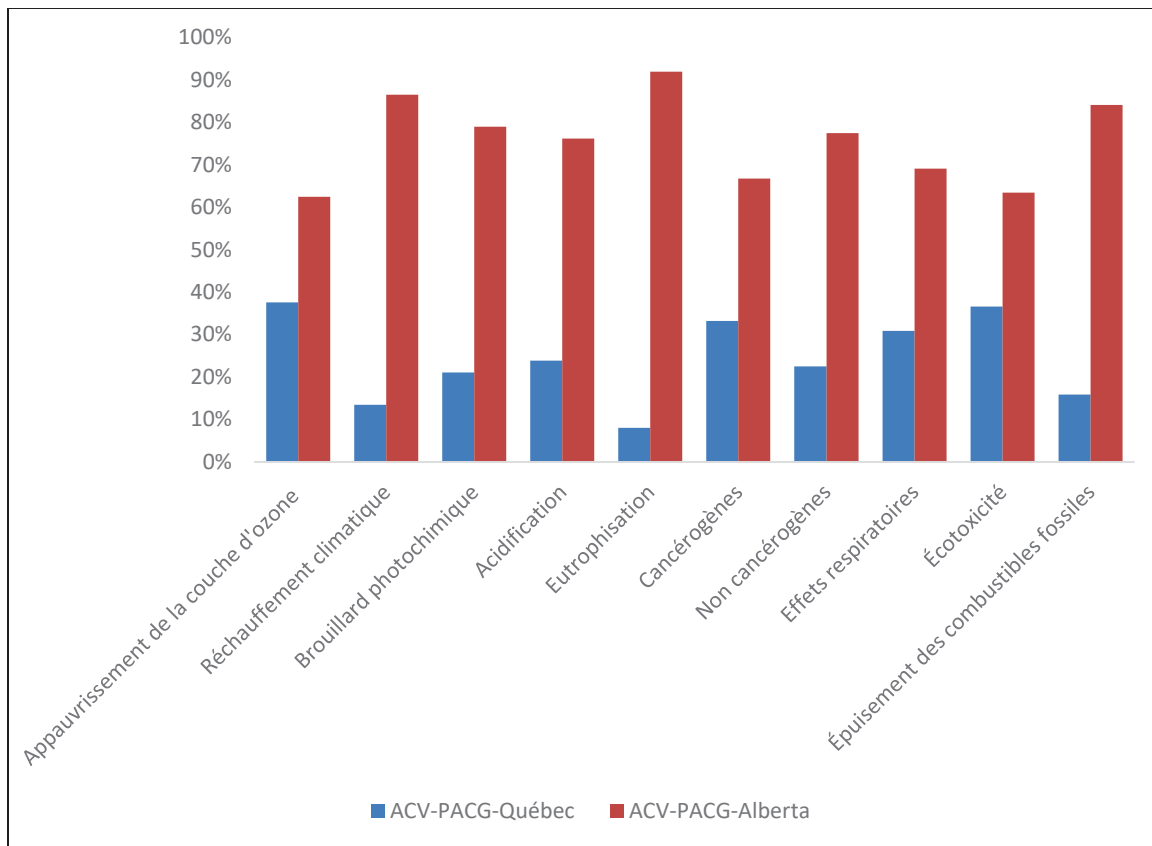


Figure 3.13 Évaluation comparative des IE
de l'installation géothermique entre le Québec et l'Alberta

La différence entre les résultats du cas du Québec et celui de l'Alberta allant d'une différence de contribution de 25% pour l'appauvrissement en couche d'ozone jusqu'à 84% pour l'eutrophisation (Voir Figure 3.13), s'explique par le fait qu'en Alberta, c'est la phase d'exploitation annuelle qui présente l'IE le plus important pour l'installation géothermique dans neuf catégories sur dix, avec une contribution moyenne de 70% pour tous les impacts contre 29% pour la production et l'installation et seulement contre 20% pour la phase de fin de vie (Voir Figure 3.14).

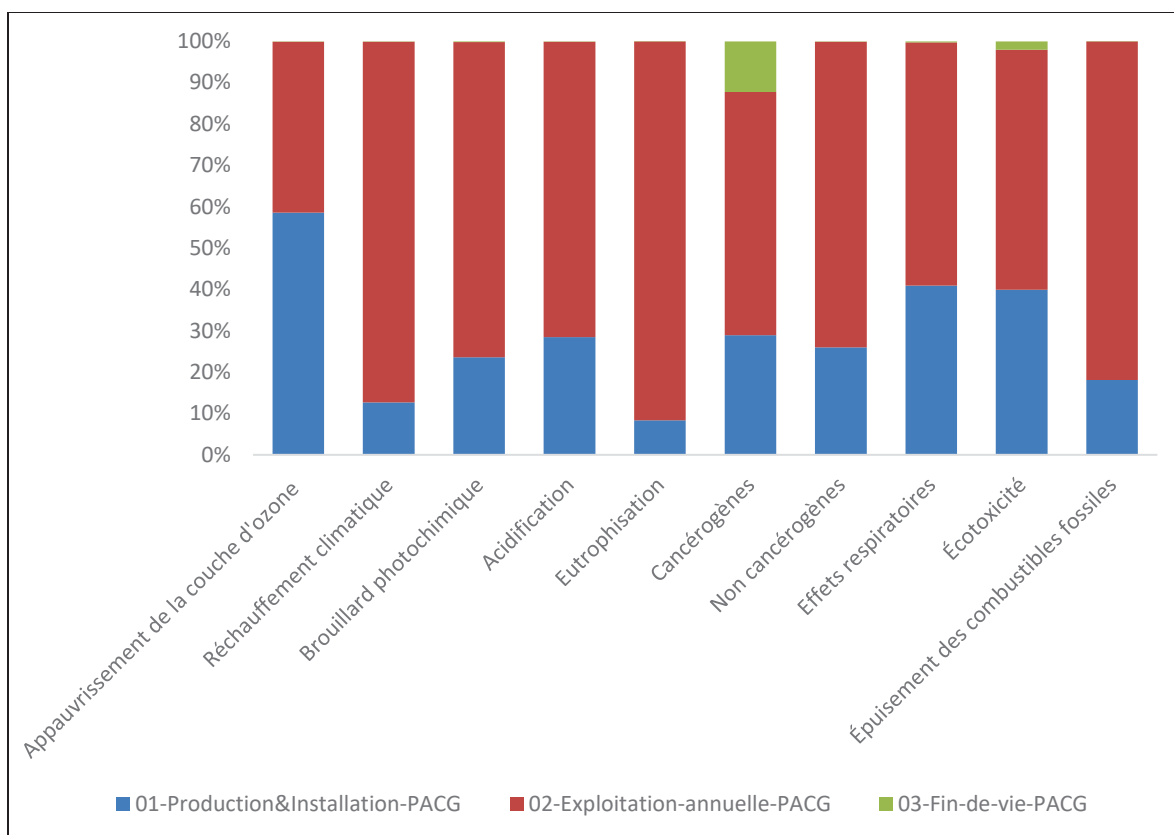


Figure 3.14 Contribution des phases de cycle de vie sur les CI en Alberta

3.4 Discussion

L'ACV du système géothermique met en lumière l'impact de plusieurs facteurs clés sur ses performances environnementales.

En effet, la composition du coulis influence directement la conductivité thermique et, par conséquent, le dimensionnement du puits géothermique. Toute modification des matériaux utilisés pour le remplissage entraîne alors des ajustements dans l'ensemble la conception du système. Cette interdépendance complique considérablement la réalisation d'études de sensibilité basées sur les variations de la composition du coulis, rendant l'optimisation du système plus complexe.

Dans ce cas, une composition majoritairement constituée de bentonite présente les impacts les plus significatifs dans l'évaluation environnementale de toutes les phases du cycle de vie. Cette influence s'explique par les caractéristiques de production et de transformation de la bentonite, qui génèrent des émissions importantes. Ces processus nécessitent également une consommation élevée de ressources, ce qui amplifie les IE globaux du système géothermique. La plupart des études antérieures utilisent une quantité nettement inférieure de bentonite comme en témoignent les travaux de (Smith et al., 2021) et (Saner, Juraske, Kübert, Blum, Hellweg & Bayer, 2010) qui ne considèrent que 0,1% et 1,7% respectivement. Cette différence significative dans les proportions utilisées entraîne des variations notables dans les résultats obtenus, mettant en évidence l'importance de la composition du coulis dans l'évaluation des IE.

D'autre part, l'IE dépend fortement de la composition du mix électrique. En effet plus la part des énergies renouvelables dans le mix est élevée, plus l'impact de la phase opérationnelle est faible.

(Aresti et al., 2022) concluent que les résultats sont influencés par le mix électrique, qui semble être un facteur dominant par rapport à la localisation géographique. Il a été démontré que le processus opérationnel génère l'impact le plus élevé dans les pays nordiques de l'Europe à l'exception de la Suède où les processus d'installation et de fabrication génèrent des émissions plus importantes que le processus d'exploitation annuel. Cela s'explique par la forte part d'énergies renouvelables dans le mix électrique de ce pays.

Ces résultats s'avèrent cohérents avec ceux obtenus dans le contexte du Québec.

Par ailleurs, l'exclusion de la consommation électrique de la pompe de circulation d'eau dans le système géothermique représente une limite méthodologique. Cette omission peut entraîner des erreurs significatives dans l'évaluation des IE lors de l'ACV.

En effet, la consommation énergétique de cette pompe représente une contribution significative à la phase opérationnelle. Elle impacte notamment les émissions de gaz à effet de serre ainsi que d'autres catégories, telles que l'épuisement des combustibles fossiles et les effets sur la santé humaine. Ces impacts sont encore plus prononcés lorsque l'électricité provient de sources fossiles, comme c'est le cas en Alberta.

Ignorer cette donnée entraîne une sous-estimation des IE réels du système géothermique, rendant les comparaisons avec d'autres technologies, potentiellement inexacte. En particulier, les résultats obtenus risquent de surévaluer la performance environnementale du système géothermique.

CONCLUSION

Au Québec, l'intégration des PACG dans les bâtiments commerciaux pourrait constituer une solution prometteuse et intéressante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, une évaluation complète de leur durabilité requiert une analyse globale prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, bien au-delà de leur consommation énergétique pendant la phase d'utilisation.

Cette étude a porté sur l'ACV d'une installation géothermique équipée d'un échangeur vertical et intégrée à un bâtiment commercial situé à Montréal. Elle a également comparé les performances environnementales de ce système à celles d'une thermopompe à source d'air.

Tout d'abord, une modélisation énergétique des charges du bâtiment a été réalisée, combinant conception architecturale à l'aide de SketchUp et simulation thermique avec OpenStudio et EnergyPlus. Ces outils ont permis d'évaluer les charges de chauffage et de climatisation tout en tenant compte des normes locales, telles que l'ASHRAE 90.1.

Ensuite, le dimensionnement du système géothermique a été effectué en utilisant des outils analytiques et numériques développés sur Python. Ce processus comprenait la sélection des pompes à chaleur, le calcul des charges au sol, la détermination des longueurs des puits, l'estimation des pertes de charge et la consommation électrique finale.

Une ACV a été menée à l'aide de SimaPro 9.6, qui a permis de modéliser les IE de l'ensemble du système.

Il est conclu que bien que les PACG pourraient consommer moins d'électricité que les PACA durant la phase d'exploitation annuelle, cet avantage est atténué dans la province du Québec. Cette situation s'explique par le mix électrique renouvelable principalement hydroélectrique. Cependant, en Alberta, où l'électricité provient majoritairement de centrales à gaz, cette phase devient le principal contributeur aux effets écologiques. Dans le cas du Québec, c'est la composition du coulis utilisé lors de la phase de production et d'installation de l'échangeur vertical qui est déterminante, représentant en moyenne 72% des IE, notamment lorsque de la

bentonite est utilisée. Cette phase représente une contribution moyenne de 85% aux différentes CI contre seulement 38% pour la thermopompe à source d'air.

RECOMMANDATIONS

Ces recommandations visent à optimiser l'ACV des systèmes géothermiques en proposant des stratégies concrètes pour mieux gérer les incertitudes, les matériaux ainsi que les scénarios prospectifs adaptés aux énergies renouvelables dans les recherches futures.

- **Intégrer l'analyse de Monte-Carlo pour le calcul d'incertitude et la matrice de pedigree pour évaluer la qualité des données :**

Cette méthode statistique permet de simuler de multiples scénarios en variant les paramètres d'entrée selon des distributions de probabilité définies. Elle aide à quantifier les incertitudes associées aux données d'inventaire et aux résultats, fournissant ainsi une meilleure compréhension des marges d'erreur et des facteurs les plus influents.

En combinant cette analyse avec la notion de matrice de pedigree, il est possible d'évaluer la qualité des données en fonction de critères tels que leur fiabilité, leur représentativité géographique et temporelle, ou encore leur exhaustivité. Chaque critère est pondéré pour attribuer des scores à chaque donnée, lesquels sont ensuite intégrés dans l'analyse Monte-Carlo.

- **Changer la composition des matériaux de remplissage :**

Remplacer la bentonite par un autre constituant dans le coulis implique une modification de la conductivité thermique, ce qui impacte directement le dimensionnement du système. Il est conseillé de proposer d'autres matériaux alternatifs, tout en respectant les normes, et de reconcevoir l'installation afin d'évaluer l'influence de ces composants sur les IE, car ils constituent des paramètres prédominants, notamment dans le cas d'une source d'énergie électrique renouvelable.

- **Variation des configurations d'échangeurs géothermiques :**

Tester différentes configurations (verticales, horizontales ou hélicoïdales) permet de comparer leurs IE et d'identifier les options les plus adaptées selon les contextes géographiques, énergétiques et économiques (Aresti et al., 2022).

- **Évaluer les applications hybrides de technologies bas-carbone :**

Associer les installations géothermiques à d'autres technologies, comme les panneaux photovoltaïques ou les chaudières à biomasse pour comparer les performances environnementales (Sevindik et al., 2021).

- **Diversifier les scénarios d'économie circulaire, d'efficacité des ressources et de croissance limitée :**

Il est recommandé de varier les scénarios dans l'ACV afin d'identifier des stratégies concrètes pour réduire les effets écologiques (Sevindik et al., 2021).

- Intégrer des scénarios d'économie circulaire, qui favorisent la réutilisation, le recyclage et la valorisation des matériaux en fin de vie.
- Adopter des scénarios d'efficacité des ressources, axés sur l'optimisation de l'utilisation des matériaux et de l'énergie.
- Explorer des scénarios de croissance limitée, qui visent à diminuer la demande énergétique et matérielle par des systèmes plus performants et une gestion contrôlée des activités.

ANNEXE I

ZONE CLIMATIQUE ASHRAE 90.1-2010 DE MONTRÉAL

Tableau-A I-1 Données climatiques des régions météorologiques de Montréal

| Province | Localisation | Code OMM (WMO) | Latitude | Longitude | Zone Climatique | WSF |
|----------|--------------------------|----------------------|----------|-----------|--------------------|-------|
| Québec | Montréal Mctavish | 716120 | 45,510 | -73,580 | 6A | 0,434 |
| | Montréal Mirabel Intl | 716278 | 45,680 | -74,040 | 6A | 0,528 |
| | Montréal St-Hubert | 713710 | 45,520 | -73,420 | 6A | 0,606 |
| | Montréal Trudeau Intl | 716270 | 45,470 | -73,740 | 6A | 0,59 |
| | Montréal Est | 716751 | 45,630 | -73,550 | 6A | 0,535 |

Tableau-A I-2 Classification des zones climatiques selon les critères thermiques

| Numéro de la Zone | Nom de la Zone | Critères Thermiques (Unités I-P) | Critères Thermiques (Unités SI) |
|--------------------------|---|--|--|
| 1A et 1B | Très Chaud – Humide (1A) Sec (1B) | $9000 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F}$ | $5000 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C}$ |
| 2A et 2B | Chaud – Humide (2A) Sec (2B) | $6300 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 9000$ | $3500 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 5000$ |
| 3A et 3B | Tempéré – Humide (3A) Sec (3B) | $4500 < \text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 6300$ | $2500 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 3500$ |
| 3C | Tempéré – Marin (3C) | $\text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 4500$ ET $\text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 3600$ | $\text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 2500$ ET $\text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 2000$ |
| 4A et 4B | Mixte – Humide (4A) Sec (4B) | $\text{CDD}50^{\circ}\text{F} \leq 4500$ ET $3600 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 5400$ | $\text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 2500$ ET $2000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 3000$ |
| 4C | Mixte – Marin (4C) | $3600 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 5400$ | $2000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 3000$ |
| 5A, 5B, et 5C | Frais – Humide (5A) Sec (5B) Marin (5C) | $5400 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 7200$ | $3000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 4000$ |
| 6A et 6B | Froid – Humide (6A) Sec (6B) | $7200 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 9000$ | $4000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 5000$ |
| 7 | Très Froid | $9000 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F} \leq 12600$ | $5000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 7000$ |
| 8 | Subarctique | $12600 < \text{HDD}65^{\circ}\text{F}$ | $7000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C}$ |

ANNEXE II

PROGRAMME PYTHON POUR LA CONCEPTION DE L'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

```
@author: Lamarche Louis & Escheikh Rania

import pandas as pd
# Chargement des charges horaires
def charger_convertir(chemin):
    charges = pd.read_csv(chemin, delimiter=',')
    charges['Heating [W] (Hourly)'] =
(charges['Heating:DistrictHeatingWater[J] (Hourly)']
/3.6e6)*1000
    charges['Cooling [W] (Hourly)'] =
(charges['Cooling:DistrictCooling[J] (Hourly)'] /3.6e6)*1000
    return charges[['Date/Time', 'Heating [W] (Hourly)',
'Cooling [W] (Hourly)']]
chemin =
'C:\Users\Escheikh\OneDrive\Bureau\Mémoire_recherche\Rania.csv'

charges_W = charger_convertir(chemin)
print(charges_W)
charges_W = charges_W.iloc[:, 1:]
print(charges_W)
#
from numpy import *
from CoolProp.CoolProp import *
from conversion_md import *
from geothermal_md import *
from design_md import *
from heat_pump_md import *
from hydraulic_md import *
#
Patm = 101.325*1000.0
hrm = array([744,672,744,720,744,720,744,744,720,744,720,744])
hrr =
array([744,1416,2160,2880,3624,4344,5088,5832,6552,7296,8016,8
760])
```

```

#
# Correction pour l'utilisation du propylène glycol
def corr_factors(pour):
    glycol_corr =
np.array([[5,0.995,0.995,1.003,0.989,0.997,1.070],

[15,0.986,0.986,1.009,0.968,0.990,1.210],

[25,0.978,0.978,1.014,0.947,0.983,1.360]])
    glycol_pour = glycol_corr[:,0]
    HC_C = np.interp(pour, glycol_pour, glycol_corr[:,4])
    TC_C = np.interp(pour, glycol_pour, glycol_corr[:,1])
    press_C = np.interp(pour, glycol_pour, glycol_corr[:,6])
    return HC_C, TC_C, press_C
#
pour = 20 #pourcentage du glycol
fluide = 'INCOMP::APG-{:d}%'.format(pour) #propylène - glycol
20%
Tfreeze = PropsSI('T_FREEZE', 'P', Patm, 'T', 300, fluide) - 273.15
#
Trefk = 4+273
mu = PropsSI('viscosity', 'T', Trefk, 'P', Patm, fluide)
rho = PropsSI('D', 'T', Trefk, 'P', Patm, fluide)
Cp = PropsSI('Cpmass', 'T', Trefk, 'P', Patm, fluide)
Pr = PropsSI('Prandtl', 'T', Trefk, 'P', Patm, fluide)
kf = PropsSI('conductivity', 'T', Trefk, 'P', Patm, fluide)
rho_eau = PropsSI('D', 'T', Trefk, 'P', Patm, 'Water')
mu_eau = PropsSI('viscosity', 'T', Trefk, 'P', Patm, 'Water')
nu = mu/rho # viscosité cinématique
nu_eau = mu_eau/rho_eau # viscosité cinématique
Sg = rho/rho_eau
#
# Paramètres de conception
Tfo_ch = 4.4
Tfo_cl = 29.5
#
# Critères de conception
nbloc = 6.0 #choix de blocs de 6 heures
nannees = 25
#
# Caractéristiques du sol
als = 0.0557 #m2/jr
alhr = als/24.0
ks = 1.98
To = 10
#

```

```

# Caractéristiques des puits
SDR = 11
rb = 0.15/2.0
kc = 1.49
di,do = sdr_pipe(1,SDR)
ri = di/2
ro = do/2
kp = 0.4
xc = rb - ro #configuration C
#
# Choix de la configuration initiale
nx = 4
ny = 2
nb = nx*ny
d = 6.0
#
# Input des données
q_ch = charges_W.iloc[:,0] #charge en chauffage en W
q_cl = charges_W.iloc[:,1] #charge en climatisation en W
q1 = 0.7*max(q_ch) #70% de la charge en chauffage
q2 = 1*max(q_cl)
q_ch = np.minimum(q_ch,q1)
BTU1 = BTUhr_W(q1)/1000
BTU2 = BTUhr_W(q2)/1000
print(q_ch)
print(q_cl)
print('Maximum chauffage (kBTU/hr:)', BTU1)
print('Maximum climatisation (kBTU/hr:)', BTU2)
#
# Choix de TS H/V/D 060
npac = 4
print('Pour satisfaire la demande {:d} PACS'.format(npac))
print('du type : TS H/V/D 060 ont été choisies (choix arbitraire)')
#
# Facteurs de corrections pour l'utilisation de glycol
fact_hc,fact_tc,fact_pres = corr_factors(pour)
#
gpm1 = 11.3 #débit pour une PAC
gpm = npac*gpm1 #débit total
debit = m3s_gpm(gpm)
mp = debit*rho
EWTB = F_C(Tfo_ch)

```

```

print('Pour une température minimale en chauffage de {:.0f}
F'.format(EWTH))
HC = 52.9 #kBTU/hr
COP_ch = 5.1
HC_corr = fact_hc*HC
CAP_fournie = npac*HC_corr
print ('La capacité corrigée pour une PAC chauffage = {:.2f}
kBTU/hr'.format(HC_corr))
print ('COP = {:.2f}'.format(COP_ch))
EWTC = F_C(Tfo_cl)
print('Pour une température minimale en climatisation de {:.0f}
F'.format(EWTC))
TC = 65.1 #kBTU/hr
EER = 19.7
COP_cl = W_BTUhr(EER)
TC_corr = fact_tc*TC
CAP_clim = npac*TC_corr
print ('La capacité corrigée pour une PAC climatisation = {:.2f}
kBTU/hr'.format(TC_corr))
print ('EER = {:.2f}'.format(EER))
if CAP_fournie > BTU1:
    print('Le nombre de PAC est suffisant en chauffage car:')
    print('La capacité nécessaire en chauffage est de : {:.2f}
kBTU/hr '.format(BTU1))
    print('La capacité fournie par les PAC en chauffage est de
: {:.2f} kBTU/hr '.format(npac*HC_corr))
else:
    print('La capacité des PAC est insuffisante car:')
    print('La capacité nécessaire en chauffage est de : {:.2f}
kBTU/hr '.format(BTU1))
    print('La capacité fournie par les PAC en chauffage est de
: {:.2f} kBTU/hr '.format(npac*HC_corr))
if CAP_clim > BTU2:
    print('Le nombre de PAC est suffisant en climatisation
car:')
    print('La capacité nécessaire en climatisation est de :
{:.2f} kBTU/hr '.format(BTU2))
    print(' La capacité fournie par les PAC en climatisation
est de : {:.2f} kBTU/hr '.format(npac*TC_corr))
else:
    print('La capacité des PAC est insuffisante car:')
    print('La capacité nécessaire en climatisation est de :
{:.2f} kBTU/hr '.format(BTU2))
    print('La capacité fournie par les PAC en climatisation est
de : {:.2f} kBTU/hr '.format(npac*TC_corr))

```

```

print('Le débit total pour les {:d} PACS est de {:.1f}
gpm'.format(npac,gpm))
print('Le débit par puits est de {:.1f} gpm'.format(gpm/nb))
#
# Initialisation des vecteurs
qm = zeros(12) #pulses mensuels
q_sol_ch = q_ch*(COP_ch-1)/COP_ch #calcul des charges au sol
horaires chauffage
q_sol_cl = -q_cl*(COP_cl+1)/COP_cl #calcul des charges au sol
horaires climatisation
q_sol = q_sol_ch + q_sol_cl
#
# Calcul des charges mensuelles (puissance moyenne)
# En utilisant chaque mois égal (730 heures)
i1 = 0
for i in range (0,12): #somme pour chacun des mois
    i2 = i1 + 730
    qm[i] = mean(q_sol[i1:i2]) #puissance moyenne du premier au
dernier jour du mois
    i1 = i2+1 #indice du mois suivant
#
# Calcul des moyennes sur bloc horaire
ibloc = int(8760/nbloc) #nombre de blocs par années
q_bloc = zeros(ibloc) #pulses bloc horaire
i1 = 0
for i in range(0,ibloc):
    i2 = int((i+1)*nbloc)
    q_bloc[i] = mean(q_sol[i1:i2])
    i1 = i2
#
# Calcul du bloc horaire maximal et minimal
qh_ch = max(q_bloc) #pulse horaire chauffage
qh_cl = min(q_bloc) #pulse horaire climatisation
#
# Calcul de la résistance de puits Hellström
Rp,rcond,rconv = Rp_fct(mp/nb,ro,ri,kp,Trefk,fluide)
Rcb,Rca = Rb_linesource(kc,ks,rb,ro,xc)
Rpb = Rcb + Rp/2
Rpa = Rca + 2*Rp
alsol = alhr/3600 #en m2/s
mon_sol = ground(ksoil=ks,alsoil=alsol,To = To)
CCf = mp*Cp
Tfi_ch = Tfo_ch - qh_ch/(mp*Cp)
Tfi_cl = Tfo_cl - qh_cl/(mp*Cp)

```

```

Tf_ch = (Tfi_ch+Tfo_ch)/2.0
Tf_cl = (Tfi_cl+Tfo_cl)/2.0
if Tfi_ch -5 < Tfreeze:
    print('La température de solidification du fluide est de
{:.1f} C'.format(Tfreeze))
    print('La température minimale du fluide est de {:.1f}
C'.format(Tfi_ch))
    print('La température de solidification du fluide est
supérieure à la norme CSA 448')
else:
    print('La température de solidification du fluide est de
{:.1f} C'.format(Tfreeze))
    print('La température minimale du fluide est de {:.1f}
C'.format(Tfi_ch))
    print('La température de solidification du fluide est
inférieure à la température minimale - 5')
    print('tel que demandé dans la norme CSA 448')
#
# Configuration de chaque puits
mon_puits=borehole(nx=nx,ny=ny,rb=rb,dist=d,Rb=Rpb,CCf=CCf,Rin
t= Rpa)
param_conception_eed = eed_params(init_month = 0,q_months =
qm,qh_heating = qh_ch,qh_cooling = qh_cl,Tfo_heating = Tfo_ch,
Tfo_cooling = Tfo_cl,n_years = nannees, n_bloc =
nbloc,flag_inter = True)
#
# Classe borefield
# Spécification d'une instance de sol
mon_design = borefield(params = param_conception_eed,ground =
mon_sol,borehole = mon_puits)
#
# Appel à la méthode Compute_L_eed pour évaluer la longueur du
champ
# Méthode suédoise avec Rb effective
Longueur = mon_design.Compute_L_eed()
#
print ('La longueur est de {:.1f} m'.format(Longueur))
H = Longueur/nb
if H < 300:
    print ('La hauteur de chaque puits est {:.1f} m'.format(H))
    print ('et est inférieure à la contrainte de 300 m')
else:
    print ('La hauteur de chaque puits est {:.1f} m'.format(H))
    print ('vous devez changer la configuration')
Rpbs = mon_design.Rbs
print ('La résistance du puits est {:.3f} K-m/W '.format(Rpb))

```

```

print ('La résistance effective du puits est {:.3f} K-m/W
'.format(Rpbs))
#####
#####
# Head losses
patm = 101.325*1000.0
rhow = PropsSI('D','T',Trefk,'P',patm,'water')
muw = PropsSI('viscosity','T',Trefk,'P',patm,'water')
nuw = muw/rhow
epsilon = 0.0
g = 9.81
Dp1 = 1000*kPa_psi(4.0)
deb1 = m3s_gpm(gpm1)
hc1 = W_BTUhr(HC_corr)
HP1 = heat_pump(flowrate=deb1,Dp = Dp1,heating_capacity = hc1)
HPv = [HP1,HP1,HP1,HP1]
#
Lpipe = 4
tube = 1.25
#
## Heat pump
### Hoze kits
Cv1 = Cv_valve('Hoze kit',tube)
qmhr1 = HP1.flowrate*3600 # m3s/hr
DPPa1 = Sg* 1e5*(qmhr1/Cv1)**2
h_hoze1 = DPPa1/(rho*g) # m de fluide
hhoze = np.array([h_hoze1,h_hoze1,h_hoze1,h_hoze1])
#
### Strainers
Cv_str1 = Cv_valve('Y-strainer',tube)
DPPas1 = Sg* 1e5*(qmhr1/Cv_str1)**2
h_str1 = DPPas1/(rho*g) # m de fluide
hstr = np.array([h_str1,h_str1,h_str1,h_str1])
#
### Ball valves
Cv_val1 = Cv_valve('Ball valves',tube)
DPPas1 = Sg* 1e5*(qmhr1/Cv_val1)**2
h_val1 = DPPas1/(rho*g) # m de fluide
hvalve = np.array([h_val1,h_val1,h_val1,h_val1])
#
tube_pac = 1.25
#
h_hpv = np.zeros(4)
di,do = sdr_pipe(tube_pac,SDR)

```

```

A1 = pi* di**2/4.0
#
for i in range(0,4):
    q = HPv[i].flowrate
    u = q/A1
    Re = di*u/nu
    ed = epsilon/di
    f = Colebrook(Re,ed)
    Rew = di*u/nuw
    fw = Colebrook(Rew,ed)
    corr = f/fw
    h_pipe = f*((Lpipe)/di)*u**2/(2*g)
    Dp = HPv[i].Dp # Pascal
    h_hp = corr*Dp/(rho*g)
    h_hpv[i] = h_hp + h_pipe + corr*(hhoze[i] + hstr[i] +
2*hvalve[i])
    print ('Heat pump number #',i+1)
    print(' h heat pump = ',h_hp)
    print(' h piping = ',h_pipe)
    print(' h hoze kit = ',corr*hhoze[i])
    print(' h strainer = ',corr*hstr[i])
    print(' h valve = ',2*corr*hvalve[i])
    print(' h total = ',h_hpv[i])
#
##Building and header
h_pipe = np.zeros(8)
gpmv = np.array([45.2,33.9,22.6,11.3,45.2,11.3,22.6,33.9])
Lpipe = np.array([8,6,22,6,28,6,28,6])
tube = np.array([3,2,2,1.25,3,1.25,2,2])
Le_string = [['Butt tee-straight','Butt 90'],
              ['Butt tee-straight'],
              ['Butt tee-straight','Butt 90','Butt 90'],
              ['Butt 90'],
              ['Butt tee-straight','Butt 90'],
              ['Butt 90'],
              ['Butt tee-straight', 'Butt 90','Butt 90'],
              ['Butt tee-straight']]
Leqv = np.zeros(8)
for i in range(0,8):
    di,do = sdr_pipe(tube[i],SDR)
    A1 = pi* di**2/4.0
    debiti = m3s_gpm(gpmv[i])
    u1 = debiti/A1
    Re = di*u1/nu
    ed = epsilon/di
    f1 = Colebrook(Re,ed)

```



```

Le = 0
for Le_s in Le_string[i]:
    Leq = sing_head_loss(Le_s,tube[i])
    Le = Le + Leq
Leqv[i] = Le
h_pipe[i] = f1*((Lpipe[i]+Le)/di)*u1**2/(2*g)
print('pipe number #',i+1,' L equivalent = ', '%.2f' % Le, '
h total = ',h_pipe[i])
#
hb1 = sum(h_pipe[1:4]) + h_hpv[3]
hb2 = sum(h_pipe[1:3]) + h_pipe[7] + h_hpv[2]
hb3 = sum(h_pipe[1:2]) + sum(h_pipe[6:8]) + h_hpv[1]
hb4 = sum(h_pipe[5:8]) + h_hpv[0]
print ('Path first heat pump= ',hb4)
print ('Path second heat pump=',hb3)
print ('Path third heat pump= ',hb2)
print ('Path last heat pump= ',hb1)
h_building = max([hb1,hb2,hb3,hb4])
print('h building (m) : ',h_building)
h_head = h_pipe[0] + h_pipe[4]
print('h header (m) : ',h_head)
#
##Geothermal Loop
debit = m3s_gpm(gpm)
debit_loop = debit/nb
tube_loop = 1
Leq_coude = sing_head_loss('Butt 90',tube_loop)
Leq_ubend = sing_head_loss('Unicoil',tube_loop)
Leq_convergent = sing_head_loss('Butt tee-branch',tube_loop)
D_loop = sdr_pipe(tube_loop,SDR)[0]
A_loop = pi*D_loop**2/4
u_loop = debit_loop/A_loop
Re_loop = D_loop*u_loop/nu
f_loop = Colebrook(Re_loop,0.0)
L_loop = 2*Longueur/nb
Lt_loop = L_loop + Leq_ubend + Leq_convergent + Leq_coude
h_loop = f_loop*(Lt_loop/D_loop)*u_loop**2/(2*g)
print('h loop (m) : ',h_loop)
#
###Interconnexions
d = 6
tube_field = array([3,2,2,2,2,1.5,1.25,1])
L_field = array([d,d,d,d,d,d,d])
tube = tube_field

```

```

Long = L_field
htotal_loop = 0
debit_volumique = debit
for j in range(0,nb-1):
    debit_volumique = debit - debit_loop
    D = sdr_pipe(tube[j],SDR)[0]
    A = pi*D**2/4.0
    u = debit_volumique/A
    Re = D*u/nu
    f = Colebrook(Re,0.0)
    Leq = 0
    h = f*((Long[j]+Leq)/D)*u**2/(2*g)
    htotal_loop = htotal_loop + h
print('h interconnections (m) : ' ,htotal_loop)
h_loop = h_loop + htotal_loop
print('h loop et interconnections (m) : ' ,h_loop)
h_tot = h_building + h_head + h_loop
print('h total (m) : ' ,h_tot)
#
#Selection of parallel pumps - Standard NPSH 5SV
rend = 0.8
CAP_ch_kW = W_BTUhr(CAP_fournie)
CAP_cl_kW = W_BTUhr(CAP_clim)
Wcomp_ch = q_ch/COP_ch
Wcomp_cl = q_cl/COP_cl
temps_operation = zeros(8760)
for i in range(0,8760):
    if q_ch[i] > 0:
        temps_operation[i] = min(q_ch[i]/CAP_ch_kW,1)
    else:
        temps_operation[i] = min(q_cl[i]/CAP_cl_kW,1)
W_pompe= mp*g*h_tot
P_elec = W_pompe/rend
Consommation_pompe_intermittent =
sum(P_elec*temps_operation,axis=0)
Wchauff = sum(Wcomp_ch,axis=0)
Wclim = sum(Wcomp_cl,axis=0)
Wcomp = Wchauff+Wclim
Energie_pump = sum(Consommation_pompe_intermittent)
print ('Pumping energy if stopped with compressor = ' ,
Energie_pump/1000, ' kW-hr')
Energie_totale = sum(Energie_pump+Wcomp)
print ('Total energy if pumps are stopped = ' ,
Energie_totale/1000, ' kW-hr')

```

ANNEXE III

DONNÉES DE PERFORMANCE – TS H/V/D 060

Tableau-A III-1 Performances des pompes à chaleur selon les sources thermiques

| Type de Pompe | Moteur du Ventilateur | Refroidissement Boucle d'Eau (30°C) | Chauffage Boucle d'Eau (20°C) | Refroidissement Eau Souterraine (15°C) | Chauffage Eau Souterraine (10°C) | Refroidissement Boucle de Sol (25°C) | Chauffage Boucle de Sol (0°C) |
|---------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| TSH/V/D 060 | ECM | Capacité : 18,52 kW EER : 5,0 | Capacité : 21,45 kW COP : 5,4 | Capacité : 20,19 kW EER : 7,3 | Capacité : 17,06 kW COP : 4,6 | Capacité : 18,87 kW EER : 5,4 | Capacité : 13,6 kW COP : 3,9 |

Tableau-A III-2 Paramètres de performance thermique et hydraulique

| TEE | GPM | PSI | FT | Débit Refroid. (cfm) | TC (°F) | SC | Ratio S/T (°F) | kW Refroid. | HR (%) |
|------|------|-----|-----|----------------------|---------|------|----------------|-------------|--------|
| 40°F | 11,3 | 2,9 | 6,7 | 1950 | 74,5 | 51,5 | 0,7 | 2,59 | 83,4 |
| 85°F | 11,3 | 2 | 4,6 | 1950 | 65,1 | 49,5 | 0,75 | 4,26 | 78,9 |

Tableau-A III-3 Caractéristiques de performance du système en chauffage et en refroidissement

| TEE | GPM | EER | HWC Refroid. | Débit Chauff. (cfm) | HC | kW Chauff. | Rend. Chauff. | Temp. Air Sortie (°F) | COP | HWC Chauff. |
|------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|------------|------------------------|
| 40°F | 11,3 | 28,8 | 2 | 2050 | 52,9 | 3,82 | 39,8 | 93,9 | 4,1 | 4,4 |
| 85°F | 11,3 | 16,3 | 5,4 | 2050 | 88,4 | 5,3 | 73,1 | 109,9 | 5,8 | 6,6 |

ANNEXE IV

DIAMÈTRE DE CONDUITE RECOMMANDÉ EN FONCTION DU DÉBIT MAXIMAL

Tableau-A IV-1 Capacités de débit des tuyaux selon le diamètre et le SDR

| Diamètre nominal | | Débit maximal | | | | Débit minimal | | | |
|------------------|----|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Pouces | mm | SDR-11 (gpm) | SDR-11 (l/s) | SDR-13,5 (gpm) | SDR-13,5 (l/s) | SDR-11 (gpm) | SDR-11 (l/s) | SDR-13,5 (gpm) | SDR-13,5 (l/s) |
| 3/4 | 19 | 3,9 | 0,25 | 4,4 | 0,28 | 3,7 | 0,23 | 3,9 | 0,25 |
| 1 | 25 | 7 | 0,44 | 8,8 | 0,56 | 5,7 | 0,36 | 6,1 | 0,38 |
| 1 1/4 | 32 | 13 | 0,82 | 15,6 | 0,95 | 9 | 0,57 | 9,8 | 0,61 |
| 1 1/2 | 40 | 19,5 | 1,23 | 22,8 | 1,44 | 12,8 | 0,81 | 13,6 | 0,86 |
| 2 | 50 | 35 | 2,2 | 39,5 | 2,5 | 18 | 1,12 | 20 | 1,3 |
| 3 | 75 | 100 | 6,3 | 110 | 6,9 | 40 | 2,5 | 43 | 2,7 |

ANNEXE V

FACTEURS DE CORRECTION DE LA CAPACITÉ POUR L'ANTIGEL

Tableau-A V-1 Facteurs de correction des performances thermiques
selon le type et la concentration d'antigel

| Type d'antigel | % Antigel | Refroid. EWT 90°F - Capacité totale | Refroid. EWT 90°F - Capacité sensible | Refroid. EWT 90°F - Puissance | Chauff. EWT 30°F - Capacité chauff. | Chauff. EWT 30°F - Puissance | Facteur correction WPD EWT 30°F |
|---------------------|-----------|---|---|-------------------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Eau | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Propylène Glycol | 5 | 0,995 | 0,995 | 1,003 | 0,989 | 0,997 | 1,07 |
| | 15 | 0,986 | 0,986 | 1,009 | 0,968 | 0,99 | 1,21 |
| | 25 | 0,978 | 0,978 | 1,014 | 0,947 | 0,983 | 1,36 |
| Méthanol | 5 | 0,997 | 0,997 | 1,002 | 0,989 | 0,997 | 1,07 |
| | 15 | 0,99 | 0,99 | 1,007 | 0,968 | 0,99 | 1,16 |
| | 25 | 0,982 | 0,982 | 1,012 | 0,949 | 0,984 | 1,22 |
| Éthanol | 5 | 0,998 | 0,998 | 1,002 | 0,993 | 0,993 | 1,04 |
| | 15 | 0,994 | 0,994 | 1,005 | 0,944 | 0,983 | 1,1 |
| | 25 | 0,986 | 0,986 | 1,008 | 0,917 | 0,974 | 1,14 |
| Éthylène Glycol | 5 | 0,998 | 0,998 | 1,002 | 0,993 | 0,993 | 1,04 |
| | 15 | 0,994 | 0,994 | 1,005 | 0,966 | 0,99 | 1,12 |
| | 25 | 0,988 | 0,988 | 1,008 | 0,966 | 0,99 | 1,2 |

ANNEXE VI

LONGUEURS ÉQUIVALENTES ET COEFFICIENTS DE DÉBITS DES VANNES EN FONCTION DU DIAMÈTRE NOMINAL

Tableau-A VI-1 Longueurs équivalentes des raccords pour différentes tailles de conduits

| Longueurs équivalentes (m) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------|------------------------|----------------|--------------------|------------|---------------------|----------------------|----------------|
| Diam. nom. cond. (mm [in]) | Socket U- bend | Socket 90 | Socket tee- br. | Socket tee- str. | Socket red. | Butt U- bend | Butt 90 | Butt tee- br. | Butt tee- str. | Socket red. |
| 19 [3/4] | 3,7 | 1 | 1,2 | 0,4 | | 3,8 | 2,2 | 2,3 | 1,4 | |
| 25 [1] | 2 | 0,8 | 1,6 | 0,4 | 1,9 | 6,8 | 3 | 2,2 | 0,8 | 1,5 |
| 32 [1 1/4] | 3,4 | 1,9 | 2 | 0,3 | 1,2 | 11 | 5,6 | 5,2 | 1,2 | 1,7 |
| 40 [1 1/2] | | 2 | 3 | 0,6 | 1,2 | 13 | 3,3 | 3,3 | 1,2 | 1,8 |
| 50 [2] | | 2,1 | 4 | 0,9 | 1,3 | | 3,7 | 4,6 | 1,2 | 1,2 |
| 75 [3] | | | | | | | 10 | 9,4 | 2,1 | 3,1 |
| 100 [4] | | | | | | | 12 | 11 | 2,2 | 4,1 |
| 150 [6] | | | | | | | 16 | 15 | 2,3 | 6,1 |

Tableau-A VI-2 Coefficients de débit des vannes et accessoires hydrauliques

| Coefficients de débits des vannes (m ³ /hr/(bar) ^{1/2}) | | | | |
|--|-------------|--------------------|-----------------|------------|
| Diam. cond. (mm [in]) | Ball Valves | Swing Check Valves | Hoze Kits - 3ft | Y-Strainer |
| 19 [3/4] | 21,6 | 11,2 | 6,9 | 15,6 |
| 25 [1] | 30,3 | 18 | 13,8 | 24,2 |
| 32 [1 1/4] | 40,6 | 30 | 29,4 | 37,2 |
| 40 [1 1/2] | 70 | 39 | 40,7 | 51,9 |
| 50 [2] | 91 | 65 | | 82,2 |
| 76 [3] | 337 | 168,6 | | 134 |
| 100 [4] | 718 | 302,7 | | 216 |
| 152 [6] | 1080 | 856 | | |

ANNEXE VII

COURBE CARACTÉRISTIQUE DES POMPES - NPSH 5SV

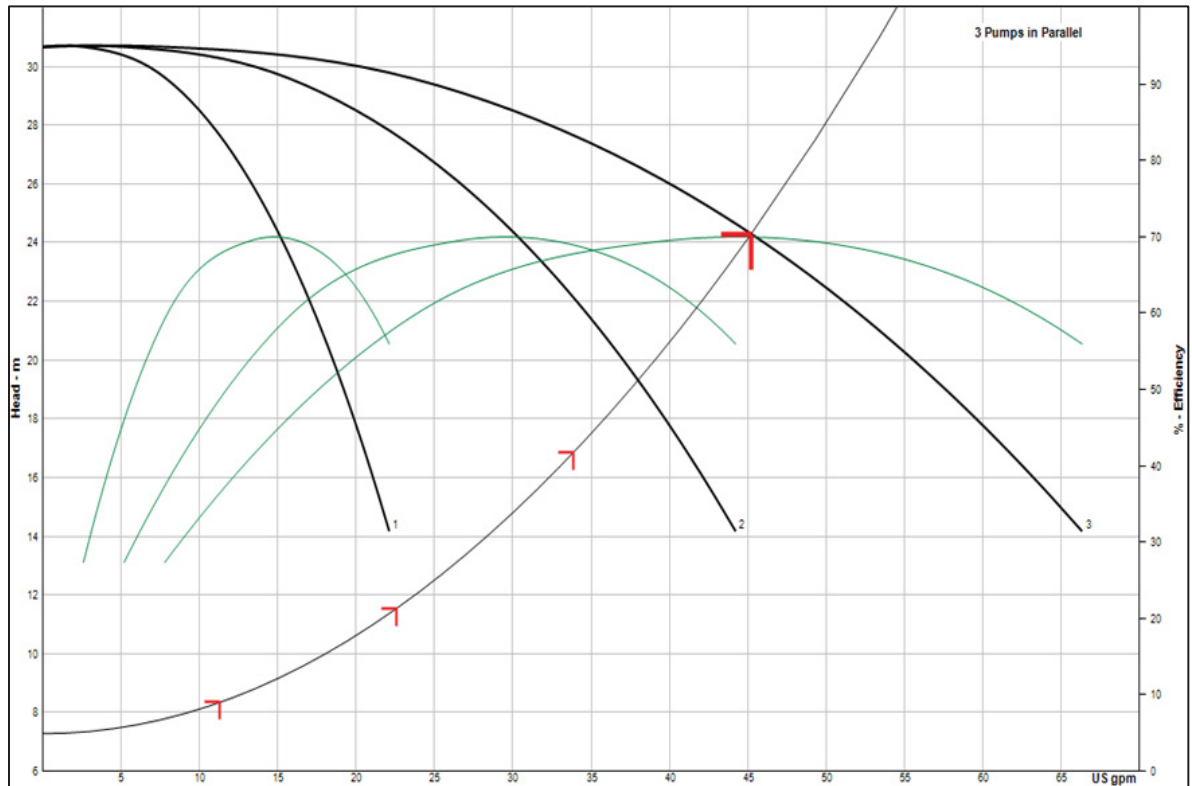


Figure-A VII-1 Courbe de performance des pompes en parallèle

ANNEXE VIII

DONNÉES DE PERFORMANCE - POMPE À CHALEUR RÉVERSIBLE INVERTER - GAMME ACTIVE SERIES GAINABLE STANDARD FBA-A(9) - R32

Tableau-A VIII-1 Performances saisonnières des unités intérieures selon la norme EN14825

| Unité intérieure | Puissance restituée (kW) | Efficacité saisonnière (selon la norme EN14825) |
|------------------|------------------------------------|--|
| FBA125A | Chaud (à – 10 °CBS ext): 12 | Froid (SEER) : 6,13 |
| | Froid : 12,1 | Chaud (SCOP) : 4,05 |

Tableau-A VIII-2 Plage de fonctionnement des groupes extérieurs

| Groupe extérieur | Plage de fonctionnement température extérieure |
|------------------|--|
| RZAG125NV1 | Mode froid (°CBS) : – 20 ~ 52 |
| RZAG125NY1 | Mode chaud (°CBH) : – 20 ~ 18 |

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbaspour, A., Yousefi, H., Aslani, A., & Noorollahi, Y. (2022). Economic and environmental analysis of incorporating geothermal district heating system combined with radiant floor heating for building heat supply in Sarein, Iran using Building Information Modeling (BIM). *Energies*, 15(23), 8914. <https://doi.org/10.3390/en15238914>
- Abusoglu, A., & Sedeeq, M. S. (2013). Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems. *Energy and Buildings*, 62, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.024>
- American National Standards Institute - Canadian Standards Association. (2016). Design and installation of ground source heat pump systems for commercial and residential buildings. ANSI/CSA C448 Series-2016.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). Energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings. ASHRAE 90.1-2022.
- Aquino, A., Bonamente, E., Rinaldi, S., Nicolini, A., & Medaglia, C. M. (2017). Life cycle assessment of a ground-source heat pump including an upstream thermal storage. *Sustainable Development, Human Health and Environmental Protection*.
- Aresti, L., Florides, G. A., Skaliontas, A., & Christodoulides, P. (2022). Environmental impact of ground source heat pump systems: A comparative investigation from south to north Europe. *Frontiers in Built Environment*, 8, 914227. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.914227>
- Aridi, M., Pannier, M.-L., Aridi, R., & Lemenand, T. (2024). Evaluating environmental impacts of domestic heat pumps: A review through life cycle assessment. *Conférence IBPSA France-La Rochelle Oléron*.
- Bobbo, S., Fedele, L., Curcio, M., Bet, A., De Carli, M., Emmi, G., ... Bernardi, A. (2019). Energetic and exergetic analysis of low global warming potential refrigerants as substitutes for R410a in ground source heat pumps. *Energies*, 12(18), 3538. <https://doi.org/10.3390/en12183538>
- Bonamente, E., & Aquino, A. (2017). Life-cycle assessment of an innovative ground-source heat pump system with upstream thermal storage. *Energies*, 10(11), 1854. <https://doi.org/10.3390/en10111854>
- Boulanger-Martel, V. (2015). *Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques* (Mémoire de maîtrise). École polytechnique de Montréal, Montréal.

- Brackney, L., Parker, A., Macumber, D., & Benne, K. (2018). *Building energy modeling with Openstudio: A practical guide for students and professionals*. Cham : Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77809-9>
- Casasso, A., & Sethi, R. (2019). Assessment and minimization of potential environmental impacts of ground source heat pump (GSHP) systems. *Water*, 11(8), 1573. <https://doi.org/10.3390/w11081573>
- Chu, T. (2019). *Life-cycle assessment of full-scale membrane bioreactor and tertiary treatment technologies in fruit processing industry* (Mémoire de maîtrise). Université de Guelph, Ontario.
- Commission Canadienne Des Codes Du Bâtiment Et De Prévention Des Incendies. (2022, 28 mars). Code national de l'énergie pour les bâtiments : Canada : 2020. Conseil national de recherches du Canada. <https://doi.org/10.4224/CY0B-KG50>
- Conseil National De Recherches Du Canada & Régie Du Bâtiment Du Québec. (2022, 4 novembre). Code de construction du Québec, Chapitre I : Bâtiment, et Code national du bâtiment : Canada 2015 (modifié). Conseil national de recherches du Canada. <https://doi.org/10.4224/JWQG-YZ35>
- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ... Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>
- Famiglietti, J., Gerevini, L., Spirito, G., Pozzi, M., Dénarié, A., Scoccia, R., & Motta, M. (2021). Environmental life cycle assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study. *Energy Reports*, 7, 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.094>
- Félix-Antoine Comeau & Jasmin Raymond. (2018). *Revue de la littérature sur les règlements et les normes relatifs aux systèmes de pompes à chaleur géothermique face à la protection des prélèvements d'eau*. Québec : Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement.
- Gouvernement du Canada, L. R. de l'énergie du C. (2023, 29 novembre). ONÉ - Résultats. Repéré à <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/avenir-energetique-canada/2023/resultats/#a3>
- Gouvernement du Canada, R. naturelles C. (2011, 1 septembre). Évolution de l'efficacité énergétique au Canada. Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada. Repéré à <https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/evolution/2019/commercial.cfm>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 39(1), 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>

- Hollberg, A., Kiss, B., Röck, M., Soust-Verdaguer, B., Wiberg, A. H., Lasvaux, S., ... Habert, G. (2021). Review of visualising LCA results in the design process of buildings. *Building and Environment*, 190, 107530. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>
- Hong, T., Kim, J., Chae, M., Park, J., Jeong, J., & Lee, M. (2016). Sensitivity analysis on the impact factors of the GSHP system considering energy generation and environmental impact using LCA. *Sustainability*, 8(4), 376. <https://doi.org/10.3390/su8040376>
- Huang, B., & Mauerhofer, V. (2016). Life cycle sustainability assessment of ground source heat pump in Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 119, 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.048>
- Hunter, A. K. (2015). *Ground source heat pump system versus gas furnace and air conditioner system* (Mémoire de maîtrise). Université de Ryerson, Toronto.
- Ioannis, G. (2014). *Environmental performance assessment of heat pumps* (Thèse de doctorat). Université internationale de Hellenic, Thessaloniki - Grèce.
- Jafarpur, P., & Berardi, U. (2021). Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints. *Journal of Building Engineering*, 42, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102725>
- Jensen, T. (2015). *The adoption of ground source heat pumps at multiple scales in North America*. phdthesis. Université Paris Saclay (COMUE) ; University of British Columbia (Vancouver, Canada), Université de Versailles Saint Quentin-en-Yvelines. Repéré à <https://theses.hal.science/tel-01373284>
- Jiang, P.-X., Zhang, F.-Z., & Xu, R.-N. (2017). Thermodynamic analysis of a solar-enhanced geothermal hybrid power plant using CO₂ as working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 116, 463-472. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.086>
- Jolliet, O., Shaked, S., Jolliet, A., Crettaz, P., & Saadé, M. (2016). *Environmental life cycle assessment*. Boca Raton : CRC Press.
- K. Alghoul, S. (2017). A comparative study of energy consumption for residential HVAC systems using Energyplus. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(2), 98. <https://doi.org/10.11648/j.ajmie.20170202.16>
- Karunathilake, H., Prabatha, T., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019, 12 juin). Costs of green residences in Canada: An economic and environmental analysis of developing renewable powered building clusters. *CSCE Annual Conference Growing with youth – Croître avec les jeunes*.
- Kathiravel, R., Zhu, S., & Feng, H. (2024). LCA of net-zero energy residential buildings with different HVAC systems across Canadian climates: A BIM-based fuzzy approach. *Energy and Buildings*, 306, 113905. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113905>

- Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. D. (2014). *Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems*. Atlanta : ASHRAE.
- Kim, J., Frank, S., Braun, J. E., & Goldwasser, D. (2019). Representing small commercial building faults in energyplus, part I: Model development. *Buildings*, 9(11), 233. <https://doi.org/10.3390/buildings9110233>
- Koroneos, C. J., & Nanaki, E. A. (2017). Environmental impact assessment of a ground source heat pump system in Greece. *Geothermics*, 65, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.08.005>
- Kyu, J., & Wang, K. (2017). Utilization of Sketchup for efficient 3D modeling of buildings. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 35(5), 431-438.
- Lamarche, L. (2013). Short-term behavior of classical analytic solutions for the design of ground-source heat pumps. *Renewable Energy*, 57, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.045>
- Lamarche, L. (2019). Horizontal ground heat exchangers modelling. *Applied Thermal Engineering*, 155, 534-545. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.006>
- Lamarche, L., Kajl, S., & Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.003>
- Le, T., Gao, W., & Novianto, D. (2019). Application of Open Studio on energy management system in residential houses. *i S M A R T, Annual 2019*.
- Litardo, J., Gomez, D., Boero, A., Hidalgo-Leon, R., Soriano, G., & Ramirez, A. D. (2023). Air-conditioning life cycle assessment research: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy and Buildings*, 296, 113415. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113415>
- Luo, J., Zhang, Q., Liang, C., Wang, H., & Ma, X. (2023). An overview of the recent development of the Ground Source Heat Pump (GSHP) system in China. *Renewable Energy*, 210, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.034>
- Marinelli, S., Lolli, F., Butturi, M. A., Rimini, B., & Gamberini, R. (2020). Environmental performance analysis of a dual-source heat pump system. *Energy and Buildings*, 223, 110180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110180>
- Miller, C., Thomas, D., Irigoyen, S. D., Hersberger, C., Nagy, Z., Rossi, D., & Schlueter, A. (2014). BIM-extracted Energyplus model calibration for retrofit analysis of a historically listed building in Switzerland. *Building Simulation Conference Atlanta, GA*.

- Milousi, M., Pappas, A., Vouros, A. P., Mihalakakou, G., Souliotis, M., & Papaefthimiou, S. (2022). Evaluating the technical and environmental capabilities of geothermal systems through life cycle assessment. *Energies*, 15(15), 5673. <https://doi.org/10.3390/en15155673>
- Noman, S., Tirumalachetty, H., & Athikesavan, M. M. (2022). A comprehensive review on experimental, numerical and optimization analysis of EAHE and GSHP systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67559-67603. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22228-0>
- Organisation internationale de normalisation. (2006). Management environnemental - Analyse du cycle de vie- Principes et cadre. ISO 14040:2006.
- P. Yadav, D. (2017). Energy saving assessment for building envelope of supermarket based on Energyplus and Openstudio. *American Journal of Civil Engineering*, 5(3), 141. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20170503.13>
- Pasquier, P. (2014). Survol des systèmes géothermiques commerciaux. *Département des génies civil, géologique et des mines Polytechnique Montréal*.
- Paulillo, A., Kim, A., Mutel, C., Striolo, A., Bauer, C., & Lettieri, P. (2021). Influential parameters for estimating the environmental impacts of geothermal power: A global sensitivity analysis study. *Cleaner Environmental Systems*, 3, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100054>
- Pratiwi, A. S., & Trutnevyte, E. (2021). Review of life cycle assessments of geothermal heating systems. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2021. Reykjavik (Iceland)*. [s.l.] : [s.n.].
- Rao, S., Conant-Gilles, D., Jia, Y., & Carl, B. (2018). Rapid modeling of large and complex high performance buildings using Energyplus. *2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA Chicago, IL*.
- RetScreen® International, Centre d'aide à la décision sur les énergies propres. (2006). Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique. Dans *Manuel d'ingénierie et d'études de cas RetScreen®*. Canada : Québec : Ressources naturelles Canada c2001-2006.
- Reza, A. M. M., & Rogoža, A. (2024). Life cycle assessment of a condensing gas boiler and compare with an air source heat pump in a residential building. *Mokslas - Lietuvos ateitis*, 16(0), 1-8. <https://doi.org/10.3846/mla.2024.21298>
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., & Bayer, P. (2010). Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1798-1813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.002>

Sevindik, S., Spataru, C., Domenech Aparisi, T., & Bleischwitz, R. (2021). A comparative environmental assessment of heat pumps and gas boilers towards a circular economy in the UK. *Energies*, 14(11), 3027. <https://doi.org/10.3390/en14113027>

Shimada, Y., Tokimatsu, K., Uchida, Y., & Kurishima, H. (2024). Environmental compatibility and economic feasibility of ground source heat pumps in tropical Asia regarding lifecycle aspects: A case study in Bangkok, Thailand. *Renewable Energy*, 223, 119896. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119896>

Simulation de Monte-Carlo, analyse d'incertitude et analyse de sensibilité dans l'analyse du cycle de vie - DEISO. (2023, 14 janvier). *DEISO Website*. Repéré à <https://dei.so/fr/monte-carlo-simulation-uncertainty-analysis-and-sensitivity-analysis-in-life-cycle-assessment/>

Smith, M., Bevacqua, A., Tembe, S., & Lal, P. (2021). Life cycle analysis (LCA) of residential ground source heat pump systems: A comparative analysis of energy efficiency in New Jersey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101364. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101364>

Tadele, D., Roy, P., Defersha, F., Misra, M., & K. Mohanty, A. (2019). Life cycle assessment of renewable filler material (biochar) produced from perennial grass (miscanthus). *AIMS Energy*, 7(4), 430-440. <https://doi.org/10.3934/energy.2019.4.430>

Thomas, L. K., Tinjum, J. M., Holcomb, F. H., & Llc, I. (2020). Environmental life cycle assessment of a deep direct-use geothermal system in champaign, Illinois. *PROCEEDINGS, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California*.

Tremblay, N. (2016). La géothermie : Une solution plus accessible que jamais. *Consultation publique sur L'aménagement des bâtiments dans une perspective de développement durable*.

Violante, A. C., Donato, F., Guidi, G., & Proposito, M. (2022). Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump. *Renewable Energy*, 188, 1029-1037. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.075>

Xia, Z. H., Jia, G. S., Ma, Z. D., Wang, J. W., Zhang, Y. P., & Jin, L. W. (2021). Analysis of economy, thermal efficiency and environmental impact of geothermal heating system based on life cycle assessments. *Applied Energy*, 303, 117671. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117671>

Zhang, T., Zhai, Y., Feng, S., Tan, X., Zhang, M., Duan, L., ... Hong, J. (2022). Does it pay to develop a ground source heat pump system? Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 305, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114378>

