

Vers une méthodologie d'évaluation énergétique et environnementale d'un puits canadien à l'aide d'une analyse de cycle de vie.

F. Moufid^{1,2}, S. Visse¹, A. Lapertot^{1*}, A. M'Saouri El Bat³, J-G Winkler³

¹ Institut de Recherche, ESTP, 28 Avenue du Président Wilson, F-94230, Cachan, France

² Eiffage Énergie Systèmes - Énergies Renouvelables Aquitaine, 33610, Canéjan, France

³ Pando2, 48 Rue René Clair, 75018 Paris, France

**(auteur correspondant : alapertot@estp.fr)*

Résumé – Dans le contexte des exigences de la réglementation RE2020 et des objectifs nationaux de neutralité carbone, la réduction à la fois de la consommation énergétique et de l'impact écologique des bâtiments devient un enjeu majeur. Le puits canadien émerge comme une solution prometteuse pour améliorer ces performances. L'objectif principal de cette étude est d'appliquer une analyse de cycle de vie d'un puits canadien en évaluant les impacts environnementaux du système tout au long de son cycle de vie. Pour cela, quatre matériaux sont étudiés et comparés. L'analyse montre qu'un puits canadien composé d'un béton bas carbone est le plus respectueux de l'environnement grâce à son faible impact en énergie grise, avec un potentiel de réchauffement climatique de 39 kg de CO₂, contre 5814 kg de CO₂ pour le PVC. Une analyse comparative de différents systèmes de chauffage, basée sur un modèle thermique dynamique, révèle que l'utilisation d'un puits canadien permet de réduire significativement l'empreinte carbone de l'énergie opérationnelle. Comparé à une chaudière individuelle au gaz, cette solution permet une diminution de 57,7 tonnes de CO₂ sur 20 ans.

Nomenclature

<i>Impact_{INIES}</i>	Impact env. issu de INIES, SI
<i>Masse_{INIES}</i>	Masse de référence INIES, kg
<i>Impact_{système}</i>	Impact env. du système, SI
<i>Masse_{système}</i>	Masse de référence du système, kg
μ	Moyenne, -
σ	Ecart type, -

<i>Abréviations</i>	
ACV	Analyse du cycle de vie
BC	Béton Bas Carbone
ICV	Inventaire du cycle de vie
PVC	Polychlorure de vinyle
RE2020	Réglementation environnementale
SNBC	Stratégie nationale bas carbone

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est responsable de plus de 43 % de la consommation énergétique annuelle et de 23 % des émissions de gaz à effet de serre dans l'environnement [1]. Il contribue de manière significative à la consommation d'énergie, à l'utilisation des ressources naturelles à la production de déchets. Pour atténuer ces impacts, des initiatives de construction durable ont été mises en place comme la Réglementation Environnementale RE2020 [2] ainsi que la Stratégie Nationale Bas-Carbone SNBC [3] qui vise une neutralité carbone à l'horizon 2050. Dans ce contexte, le recours à des solutions techniques innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique et environnementale des bâtiments devient nécessaire.

Le puits canadien, ou échangeur géothermique à air, est une technologie exploitant l'inertie thermique du sol pour préchauffer ou rafraîchir l'air entrant dans un bâtiment, réduisant ainsi la consommation énergétique liée au chauffage et au refroidissement. Ce système, de plus en plus étudié dans le cadre des bâtiments durables, présente toutefois des impacts environnementaux potentiels liés aux matériaux utilisés pour sa construction, nécessitant une évaluation globale.

En effet, des études récentes ont déjà exploré les performances environnementales de systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Les travaux de Raluy et al. [4] ont mis en évidence que, pour une chaudière combinant gaz, électricité et pompe à chaleur, la phase d'utilisation est la plus impactante, tandis que les pompes à chaleur se révèlent plus performantes sur le plan environnemental. De plus, Saoud et al. [5] ont mené une étude sur une pompe à chaleur utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire dans un bâtiment résidentiel. Les auteurs soulignent que les principaux impacts, notamment sur la couche d'ozone, proviennent des matériaux tels que les tuyaux en cuivre et les fluides frigorigènes. Par ailleurs, une étude menée par Uddin et al. [6] a démontré qu'un échangeur air-sol équipé de tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) présente des avantages par rapport à ceux en acier, notamment grâce à une consommation d'énergie réduite. Cependant, il reste à réaliser une évaluation environnementale globale qui couvre l'ensemble du cycle de vie d'un puits canadien en comparant différents matériaux. Cette démarche est essentielle pour identifier les compromis environnementaux et énergétiques pour déterminer les options les plus durables.

L'innovation de cette étude est que ce système, largement étudié dans le contexte des bâtiments durables, soulève néanmoins des préoccupations concernant les impacts environnementaux associés aux matériaux utilisés pour sa construction, ce qui rend nécessaire une évaluation énergétique et environnementale combinée. L'objectif de cette étude est de réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un puits canadien afin d'évaluer ses impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie : de l'extraction des matières premières à sa fin de vie. L'ACV a été conduite en utilisant une méthodologie pour évaluer divers critères environnementaux. L'analyse a été réalisée pour 4 matériaux différents afin de comparer les résultats : l'acier, le PVC, le béton classique et le béton bas carbone (BV C25 DECA4 Carat).

Tout au long de cette étude, la méthodologie sera présentée en décrivant le système, la frontière de l'étude et les critères d'évaluation. Les résultats et l'analyse des impacts environnementaux seront ensuite comparés pour divers matériaux et systèmes de chauffage.

2. Description de la méthodologie

La méthodologie pour réaliser l'ACV d'un système énergétique, se décompose en quatre étapes principales, comme le présente la figure 1. Dans un premier temps, les objectifs et le champ de l'étude ont été définis, en précisant les caractéristiques du système à analyser ainsi que ses frontières, incluant les phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie. Ensuite, l'inventaire du cycle de vie consiste à collecter et à quantifier les flux de matières et d'énergie associés à chaque phase du cycle de vie du produit. Les données nécessaires peuvent être collectées à partir de bases fiables, telles qu'Inies, Ecoinvent ou GaBi, pour modéliser les impacts environnementaux liés aux matériaux utilisés ainsi qu'à la consommation d'électricité et/ou de gaz du bâtiment, conformément aux normes ISO 14040 et ISO 14044. Puis, lors de la phase d'évaluation des impacts, les indicateurs environnementaux ont été sélectionnés afin de les calculer. Enfin, la phase d'interprétation permet de vérifier la cohérence des résultats.

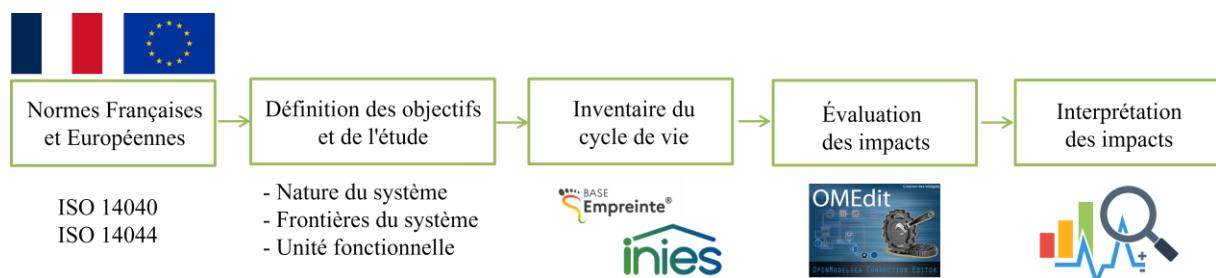


Figure 1 : Méthodologie suivie dans le cadre de l'étude.

2.1. Description du système et de la frontière de l'étude

Dans le cadre de cette étude environnementale, l'analyse s'est concentrée sur les matériaux constitutifs des éléments principaux du système, à savoir les conduits de gaine et la bouche d'entrée d'air. En revanche, l'impact environnemental du ventilateur, en raison de sa masse négligeable par rapport au reste du système, a été exclu de l'analyse.

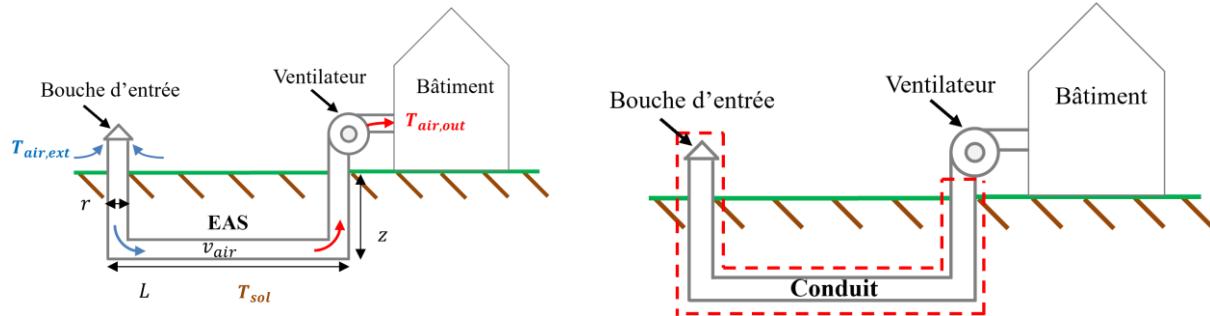


Figure 2: Schéma du système (à gauche) et frontière de l'étude (à droite).

2.2. Inventaire du cycle de vie

La réalisation de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) repose sur la collecte de données environnementales provenant de bases de référence. Ces sources fournissent des informations environnementales importantes pour évaluer les impacts associés aux matériaux de construction et à la consommation énergétique.

La base INIES constitue la principale source de données environnementales réglementaires pour les produits de construction. Elle rassemble des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES), qui détaillent les impacts environnementaux des matériaux et composants utilisés dans la construction. Ces fiches permettent d'évaluer les effets environnementaux tout au long du cycle de vie des matériaux, de l'extraction des matières premières à leur production, mise en œuvre et fin de vie.

En complément, la Base Empreinte de l'ADEME a été utilisée pour collecter des données environnementales relatives aux consommations d'énergie, telles que l'électricité et le gaz. Cette base fournit des facteurs d'impact environnemental associés à l'utilisation de l'énergie, prenant en compte des indicateurs tels que les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources, l'acidification des sols, et d'autres impacts environnementaux.

Dans le cadre de notre étude, la base INIES a permis d'extraire des données sur les matériaux qui peuvent être intégrés au système énergétique, tandis que la Base Empreinte de l'ADEME a fourni des informations sur les impacts environnementaux liés à la consommation énergétique. L'utilisation de ces deux bases assure une évaluation globale des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du système.

2.3. Evaluation des impacts

La formule générale pour l'analyse de cycle de vie des impacts globaux est la suivante :

$$ACV_{finale} = ACV_{énergie grise} + ACV_{énergie opérationnelle}$$

L'analyse du cycle de vie liée à l'énergie grise évalue les impacts environnementaux associés aux matériaux du système en fonction de sa masse. Quant à l'analyse de cycle de vie de l'énergie opérationnelle, elle est calculée en multipliant l'empreinte carbone (réchauffement climatique) par la consommation énergétique du bâtiment. Une fois toutes les données extraites, celles-ci ont dû être ramenées à la masse. Pour ce faire, il a été nécessaire de diviser la masse

du système par la masse de référence définie dans la base INIES, puis de multiplier ce ratio par la valeur de l'impact carbone.

$$\left\{ \begin{array}{l} ACV_{énergie grise} = Impact_{INIES} * \left(\frac{Massee_{système}}{Massee_{INIES}} \right) \\ ACV_{énergie opérationnelle} = Impact_{ADEME} * Consobâtiment \end{array} \right.$$

Le tableau 1 décrit divers indicateurs environnementaux de la base INIES $Impact_{INIES}$ permettant d'évaluer les impacts environnementaux dans le cadre de l'ACV du système. Les indicateurs d'impact environnemental analysés incluent :

- Réchauffement climatique : Évalué en kg de CO₂ équivalent, il mesure les émissions de gaz à effet de serre responsables des changements climatiques.
- Appauvrissement de la couche d'ozone : Exprimé en kg de CFC⁻¹¹ équivalent, il reflète les effets des substances détruisant l'ozone stratosphérique.
- Acidification des sols et de l'eau : Mesurée en kg de SO₂ équivalent, elle traduit les effets des émissions acides sur les écosystèmes terrestres et aquatiques.
- Eutrophisation : Évaluée en kg de PO₄³⁻ équivalent, elle illustre les impacts des rejets nutritifs causant la prolifération d'algues dans les milieux aquatiques.
- Formation d'ozone troposphérique (smog) : Exprimée en kg de C₂H₄ équivalent, elle indique les émissions favorisant la formation de smog, nuisible à la santé humaine.
- Épuisement des ressources abiotiques : Mesuré sous deux formes :
 - Les éléments, reflétant l'utilisation de ressources minérales rares (kg Sb équivalent).
 - Les combustibles fossiles, mesurant la consommation d'énergie non renouvelable (MJ).

Tableau 1 : Impacts environnementaux de différents indicateurs de la base INIES pour les différents matériaux étudiés.

$Impact_{INIES}$	PVC	Acier	Béton classique	Béton bas carbone
Unité fonctionnelle	<i>ml</i>	<i>ml</i>	<i>m³</i>	<i>m²</i>
Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq.)	7,27	$3,17 * 10^1$	$1,43 * 10^3$	4,89
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC ⁻¹¹ eq.)	$1,68 * 10^{-7}$	$2,92 * 10^{-6}$	$1,67 * 10^{-4}$	$4,09 * 10^{-6}$
Acidification des sols et de l'eau (kg SO ₂ eq.)	$2,86 * 10^{-2}$	$1,62 * 10^{-1}$	4,89	$1,56 * 10^{-1}$
Eutrophisation (kg (PO ₄) ³⁻ eq.)	$1,02 * 10^{-2}$	$9,02 * 10^{-2}$	9,67	$5,01 * 10^{-2}$
Formation d'ozone photochimique (kg C ₂ H ₄ eq.)	$3,44 * 10^{-3}$	$2,28 * 10^{-2}$	1,14	$1,53 * 10^{-2}$
Épuisement des ressources abiotiques éléments (kg Sb eq.)	$3,21 * 10^{-6}$	$1,19 * 10^{-3}$	$2,96 * 10^{-3}$	$3,88 * 10^1$
Épuisement des ressources abiotiques combustibles fossiles (MJ)	$1,23 * 10^2$	$4,16 * 10^2$	$1,78 * 10^4$	$4,75 * 10^2$
Pollution de l'air (m ³)	$3,48 * 10^2$	$9,04 * 10^3$	$1,30 * 10^5$	$6,08 * 10^3$
Pollution de l'eau (m ³)	$1,90 * 10^1$	$4,12 * 10^2$	$3,13 * 10^4$	$1,02 * 10^1$
$Masse_{INIES}$ (kg)	1,3	5,6	$2,40 * 10^3$	$4,63 * 10^2$
$\rho_{matériaux}$ (kg/m³)	$6,80 * 10^2$	$7,850 * 10^3$	$2,40 * 10^3$	$2,32 * 10^3$
$\lambda_{matériaux}$ (W/m.K)	$1,70 * 10^{-1}$	$5,00 * 10^1$	2	2
$Cp_{matériaux}$ (J/kg.K)	$1,00 * 10^3$	$4,60 * 10^2$	$9,00 * 10^2$	$9,00 * 10^2$

Le tableau 1 indique également la masse définie dans la base INIES pour les quatre matériaux étudiés. La masse des conduits circulaires a été déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$Massee_{système} = \rho_{matériaux} * \frac{\pi}{4} * (D_{int}^2 - D_{ext}^2) * (L_{tube} + 2 * z + 1)$$

Une fois la masse du puits canadien calculée, les 7 impacts environnementaux ont été déterminés pour évaluer l'ACV de l'énergie grise. Parallèlement, un modèle thermique dynamique a permis de simuler la demande énergétique du bâtiment et la consommation du système, permettant ainsi d'évaluer l'ACV de l'énergie opérationnelle sur la durée de vie du puits canadien, fixée à 20 ans.

3. Résultats et discussions

Le modèle thermique s'appuie sur une de nos recherches, qui est détaillé dans [7], et a été comparé à des données expérimentales recueillies sur la plateforme géothermique de l'IUT Robert Schuman à Strasbourg [8, 9]. Ce modèle thermique, développé sous OpenModelica, a été validé expérimentalement avec une erreur moyenne relative de 5,7 % sur une année complète [7], assurant ainsi sa fiabilité pour simuler les performances énergétiques du système.

Le puits canadien de référence est dimensionné selon les caractéristiques de la plateforme expérimentale. Il est enterré à 1 m de profondeur et se compose d'un tube en PVC de 100 m de long, avec un diamètre de 30 cm et une épaisseur de 1,5 cm. Ce dimensionnement est également retenu pour les conduits en béton classique, en béton bas carbone (BV C25 DECA4 Carat) et en acier. Toutefois, afin d'assurer une comparaison plus cohérente avec les matériaux disponibles sur le marché, l'épaisseur du tube en acier a été ajustée à 2 mm.

Les caractéristiques ont été intégrées au modèle thermique dynamique, en supposant qu'il est connecté à une maison individuelle avec un volume d'air de 450 m³ et un taux de renouvellement d'air neuf de 0,64 vol/h. Enfin, une évaluation environnementale a été réalisée en calculant les indicateurs présentés dans le tableau 1.

3.1. Etude environnementale du puits canadien de référence

Les résultats, présentés en figure 3, indiquent que l'impact environnemental majeur du puits canadien est lié au réchauffement climatique, avec une contribution de 5814 kg CO₂ eq. sur l'ensemble du cycle de vie, ainsi qu'à une forte consommation d'énergie fossile (98369 MJ).

L'épuisement de la couche d'ozone ($1,34 * 10^{-4}$ kg CFC-11 eq.) et des ressources abiotiques – éléments ($2,57 * 10^{-3}$ kg Sb eq.) reste limité, témoignant d'un faible impact sur ces aspects. Les effets sur l'eutrophisation (8,16 kg PO₄³⁻ eq.) et la formation d'ozone photochimique (2,75 kg C₂H₄ eq.) présentent des valeurs modérées et nécessitent des efforts pour limiter leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques (eutrophisation) et la qualité de l'air (ozone photochimique). L'acidification des sols et de l'eau (22,87 kg SO₂ eq.) est préoccupante, en raison des matériaux enterrés pendant la phase d'utilisation, ce qui souligne l'importance de privilégier des matériaux plus durables.

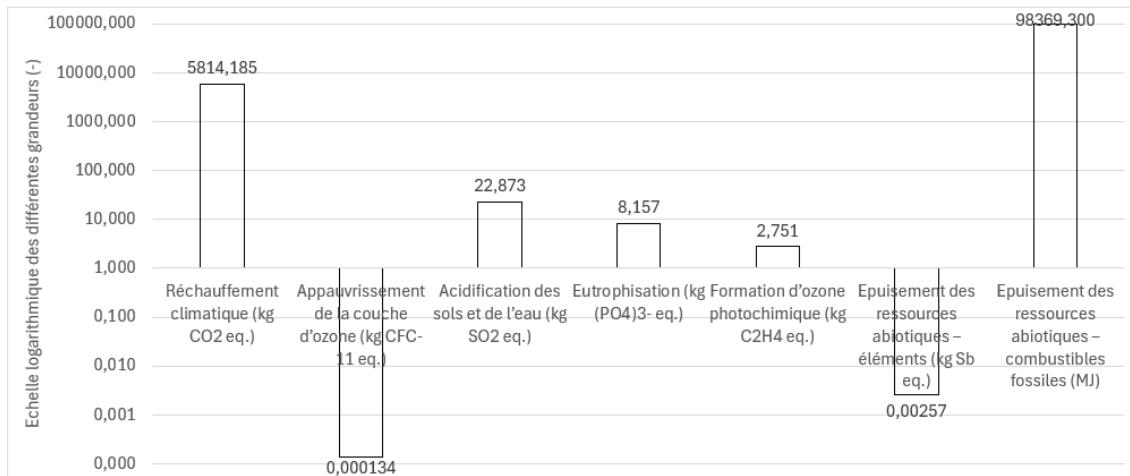


Figure 3 : Evaluation des indicateurs environnementaux pour la simulation de référence.

3.2. Comparaison des différents matériaux

Dans cette section, nous avons réalisé une comparaison des résultats de l'ACV liés à l'énergie grise pour différents matériaux couramment utilisés dans les puits canadiens.

Les résultats, illustrés par la figure 4, révèlent des disparités significatives en termes de réchauffement climatique. L'acier émet 9161 kg de CO₂ eq. contre 5814 kg de CO₂ eq. pour le PVC. Le béton classique et bas carbone présentent des résultats négatifs en raison de la différence entre l'acier et le PVC, factuellement, ils émettent respectivement 2733 et 39 kg de CO₂ eq. L'acier est particulièrement impactant en raison des procédés industriels intensifs, tels que l'utilisation de fours à très haute température, comme les fours à arcs électriques. Ces procédés énergivores augmentent considérablement les émissions de gaz à effet de serre.

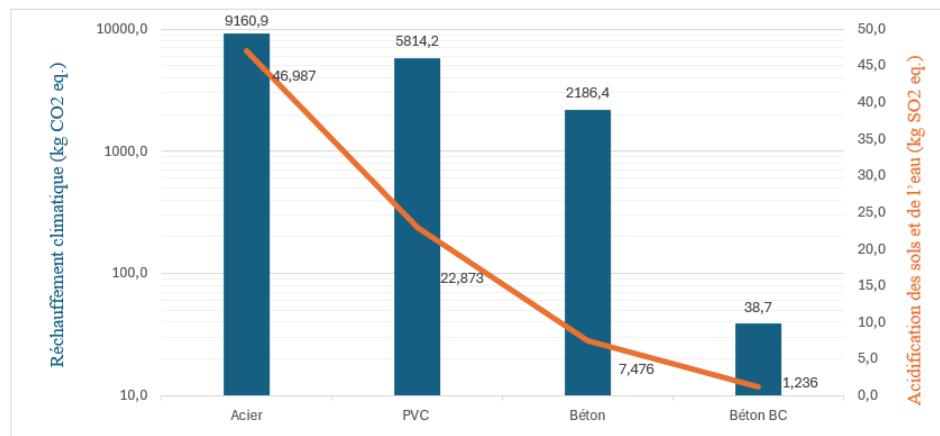


Figure 4 : Comparaison des impacts environnementaux pour les différents matériaux.

En ce qui concerne l'acidification des sols et de l'eau, l'acier et le PVC demeurent les matériaux les plus impactants avec des valeurs de 47 et 23 kg SO₂ eq., respectivement. L'acidification provient de la transformation des matières et aux rejets associés. Les autres matériaux, tels que le béton bas carbone (7 kg SO₂ eq.) et le béton bas carbone (1 kg SO₂ eq.), montrent des impacts relativement faibles, qui réduisent les émissions liées au ciment traditionnel en utilisant des matériaux substitutifs, comme des cendres volantes.

Pour mieux exploiter les résultats et faciliter les comparaisons, les valeurs centrées réduites de chaque indicateur ont été calculées selon la formule suivante. Dans ce cas, plus la valeur de l'impact réduit centrée diminue, plus le système énergétique est vertueux.

$$ACV_{centré réduit} = \frac{(ACV_{système} - \mu)}{\sigma}$$

La figure 5 présente un radar illustrant les 7 indicateurs environnementaux en fonction de l'impact réduit centré, pour 4 matériaux différents. Les résultats montrent que le puits canadien en acier est le plus impactant sur 6 des 7 indicateurs étudiés. Cette supériorité est justifiée par les techniques très énergivore pratiquée par l'industrie de l'acier. L'indicateur pour lequel l'acier n'est pas le plus impactant est l'épuisement des ressources abiotiques, où le béton bas carbone domine. Ce résultat s'explique par le fait que, pour réduire les émissions de CO₂ lors de la production des conduits en béton bas carbone, les processus nécessitent l'utilisation de ressources minérales. Étant donné que le PVC est le deuxième matériau le plus impactant pour la plupart des indicateurs, il est préférable d'utiliser du béton classique ou du béton bas carbone pour améliorer les performances environnementales du système.

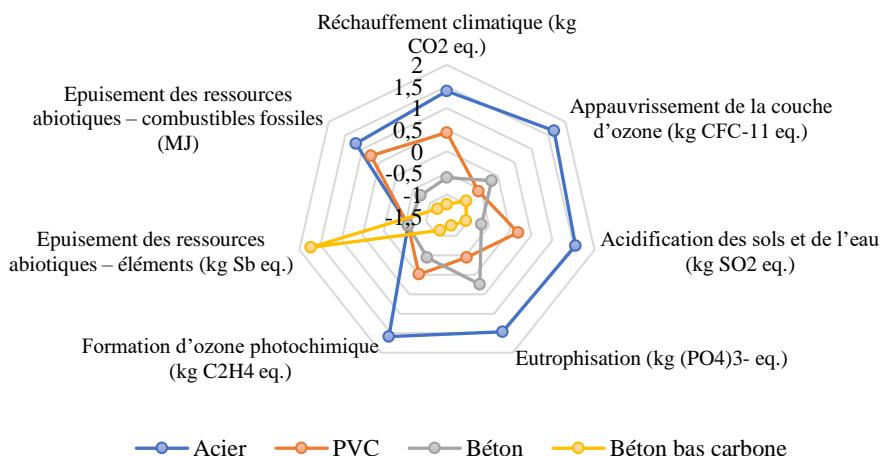


Figure 5 : Graphique radar pour comparer les impacts environnementaux des divers matériaux.

3.3. Comparaison de différents systèmes de chauffage

Dans cette partie, nous avons considéré l'analyse de cycle de vie du système énergétique lié à l'énergie opérationnelle du bâtiment et nous avons utilisé uniquement l'impact carbone, car la base de l'ADEME est moins détaillée pour les autres indicateurs.

Le modèle thermique dynamique a permis de simuler la consommation énergétique d'un bâtiment, indiquant une demande énergétique de 195,6 MWh sur 20 ans. Tout d'abord, le puits canadien consomme 14,8 MWh d'électricité pour le fonctionnement de son ventilateur. Cependant, pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment, un système d'appoint est nécessaire, entraînant une consommation supplémentaire de 16,2 MWh et la production de 1,61 tonnes de CO₂ sur cette période.

Par ailleurs, le modèle a simulé une chaudière individuelle au gaz avec un rendement de 1. Avec une consommation de 195,6 MWh, ce système engendre 59,27 tonnes de CO₂ sur 20 ans. En comparaison, le puits canadien permet de réduire les émissions de CO₂ de 57,7 tonnes sur cette période par rapport à une chaudière à gaz. Les travaux de Bisoniya et al. [10] ont également mis en évidence des réductions significatives, avec un gain de 101,3 tonnes de CO₂ sur 50 ans par rapport à un système de chauffage au charbon pour des conditions météorologiques en Inde.

Tableau 2 : Comparaison des empreintes carbone pour différents systèmes de chauffage.

Différents systèmes de chauffage	Consommation du système sur 20 ans (en MWh)	Consommation auxiliaire sur 20 ans (en MWh)	Coeff. d'impact (en kg CO ₂ /kWh)	Empreinte carbone (en tonne de CO ₂ eq.)
Chaudière individuelle	$1,96 * 10^2$	0	$3,03 * 10^{-1}$	$5,93 * 10^1$
Puits canadien	$1,48 * 10^1$	$1,62 * 10^2$	$5,2 * 10^{-2}$	1,61

4. Conclusion et perspectives

En conclusion, une analyse de cycle de vie a été appliquée sur un puits canadien pour évaluer ses impacts environnementaux sur l'ensemble de son cycle de vie. Les résultats de l'ACV démontrent que l'impact environnemental du système peut être réduit en optant pour des matériaux tels que le béton bas carbone, qui génère une énergie grise significativement plus faible que d'autres matériaux comme l'acier ou le PVC. De plus, le puits canadien permet de réduire l'empreinte carbone de l'énergie opérationnelle, offrant ainsi une alternative plus écoénergétique comparée aux solutions traditionnelles, comme les chaudières à gaz.

Dans le cadre de cette étude, il serait pertinent de mener une analyse de sensibilité afin d'identifier les paramètres exerçant une influence prépondérante sur les indicateurs environnementaux, notamment l'empreinte carbone et le coût environnemental.

Références

- [1] Ministères aménagement du territoire transition écologique. Construction et performance environnementale du bâtiment, 2020.
- [2] Ministère de la transition écologique. Réglementation Environnementale des bâtiments neufs (RE2020), 2024.
- [3] Ministères aménagement du territoire transition écologique. Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), 2018.
- [4] R. G. Raluy et A. C. Dias, Domestic hot water systems: Environmental performance from a life cycle assessment perspective, *Sustainable Production and Consumption*, 26 (2021) 1011-1020, doi: 10.1016/j.spc.2021.01.005.
- [5] A. Saoud, H. Harajli, et R. Manneh, Cradle-to-grave life cycle assessment of an air to water heat pump: Case study for the Lebanese context and comparison with solar and conventional electric water heaters for residential application, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021) 103253, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103253.
- [6] Md. S. Uddin, R. Ahmed, et M. Rahman, Performance evaluation and life cycle analysis of earth to air heat exchanger in a developing country, *Energy and Buildings*, 128 (2016) 254-261, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.088.
- [7] Cuny, M. and Lapertot, A. and Kadoch, B. and Le Métayer, O. Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different French climates. *Renewable Energy*, 157 (2020) 342 – 352. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.115>
- [8] J. Lin, H. Nowamooz, S. Braymand, P. Wolff, C. Fond, Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system, *Renewable Energy* (2018) 0960–1481. doi: 10.1016/j.renene.2018.06.106.
- [9] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, V. Magnenet, F. C., Influence of coating soil types on the energy of earth-air heat exchanger, *Energy and Buildings*, 158 (2018) 1000 – 1012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.048>.
- [10] T. S. Bisoniya, A. Kumar, et P. Baredar, Energy metrics of earth-air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India, *Energy and Buildings*, vol. 86, p. 214-221, janv. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.10.012.