



Titre: Décarbonation des bâtiments existants avec des pompes à chaleur
Title: géothermiques haute température

Auteur: Jasmin Faucher
Author:

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Faucher, J. (2025). Décarbonation des bâtiments existants avec des pompes à
Citation: chaleur géothermiques haute température [Mémoire de maîtrise, Polytechnique
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/66493/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/66493/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Michaël Kummert
Advisors:

Programme: Génie énergétique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Décarbonation des bâtiments existants avec des pompes à chaleur
géothermiques haute température**

JASMIN FAUCHER

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie énergétique

Juin 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Décarbonation des bâtiments existants avec des pompes à chaleur
géothermiques haute température**

présenté par **Jasmin FAUCHER**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Huu Duc VO, président

Michaël KUMMERT, membre et directeur de recherche

Frédéric GENEST, membre externe

DÉDICACE

Bien plus que l'or, recherche la sagesse ; bien plus que l'argent, recherche l'intelligence.

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche Michaël Kummert pour sa grande disponibilité, ses précieux conseils, son expertise et l'environnement de travail agréable qu'il a su créer au cours des 2 dernières années et demi. Ce chapitre n'aurait pas été le même (et surtout pas aussi plaisant) sans son apport indéniable tant sur le plan technique que sur le plan humain. Je sens déjà un brin de nostalgie s'installer en écrivant ces lignes.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury soient Huu Duc Vo et Frédéric Genest pour leur temps et leur rétroaction constructive sur ce projet.

J'ai également une pensée toute spéciale pour Philippe Pasquier ainsi que mes collègues et amis de la chaire de recherche en géothermie sur l'intégration des puits à colonne permanente dans les bâtiments institutionnels. C'est votre travail acharné pour faire avancer la géothermie au Québec et ailleurs qui a d'abord piqué ma curiosité, qui m'a ensuite donné l'idée d'en faire un projet de maîtrise et qui m'a finalement convaincu de me lancer pour faire carrière dans le domaine. Ce fut un réel plaisir de vous côtoyer et d'apprendre à vos côtés.

Merci également à tous mes collègues et amis du Beelab avec qui j'ai partagé tant de beaux moments. Je retiens spécialement les sandwiches moutardés de Jasmin (pas moi, le cuistot), notre triathlon (ou tentative de) sur le mont Royal, les 5 à 7 (qui ne finissent pas à 7) et le C-307 (communément appelé le « bunker »).

J'aimerais aussi remercier Francis Lacharité, Patrick Trudel et Louis Coulombe pour leur participation à l'élaboration des cartes de performance. J'en profite pour souligner la grande flexibilité de mon employeur gbi qui m'a permis de concilier travail et études.

Je ne voudrais pas manquer l'opportunité de souligner ma famille et mes amis qui m'ont encouragé sans relâche et par des actions concrètes tout au long de cette aventure qui a été teintée par l'aboutissement de plusieurs projets personnels. Sans vous, je n'aurais assurément pas pu y arriver.

Marie-France, qui a été là dans les moments où j'en avais le plus besoin. C'est ensemble que nous nous sommes engagés dans ce périple (2 jours après nos fiançailles) et c'est ensemble qu'on franchit maintenant la ligne d'arrivée (520 jours après notre mariage). Je n'ai pas suffisamment de mots alors merci!

Finalement, ce projet a été réalisable grâce au soutien du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada, l'Institut de l'énergie Trottier, Forage FTE, Marmott Energies, Richelieu Hydrogéologie et Versaprofiles.

RÉSUMÉ

Les changements climatiques sont une priorité pour les gouvernements du monde entier. Au Québec, la carboneutralité est visée d'ici 2050 et l'économie doit être décarbonée rapidement. Le secteur du bâtiment retient particulièrement l'attention. Il contribue à hauteur de 10% des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la province, ce qui peut paraître faible lorsque comparé avec les secteurs industriel et du transport qui représentent à eux deux 58% des émissions de GES. Les bâtiments limitent toutefois la capacité à électrifier, et donc décarboner, ces autres secteurs de première importance. Ils sont responsables de 50% de la puissance maximale appelée sur le réseau électrique provincial lors de pointes hivernales en raison des grands besoins de chauffage engendrés par un climat froid. Cela est dû à l'utilisation massive de système de chauffage des bâtiments à l'électricité de type résistif et peu efficace.

Les bâtiments institutionnels sont en retard dans la course à la décarbonation. Les écoles québécoises demeurent chauffées par des chaudières au gaz naturel dans 45% des cas. Il importe des les électrifier, mais de le faire efficacement afin de ne pas amplifier le problème de l'appel de puissance électrique en pointe. Les pompes à chaleur (PAC) sont une avenue prometteuse et déjà bien connue pour y arriver. La grande majorité des PAC installées au Québec sont dites aérothermiques, c'est-à-dire qu'elles puisent de la chaleur dans l'air ambiant en hiver. Bien qu'un coefficient de performance moyen en saison de chauffage (SCOP) intéressant puisse généralement être atteint, ces PAC souffrent d'une baisse de performance et de capacité lorsque des froids extrêmes surviennent. C'est toutefois à ces moments que l'appel de puissance électrique est un enjeu et il faut donc se tourner vers d'autres alternatives.

Une pompe à chaleur géothermique (PACG) répond à cet enjeu en puisant de la chaleur dans le sol, là où la température est relativement constante à l'année. Le potentiel de cette solution pour mitiger les impacts sur la demande de pointe en électricité de la décarbonation des bâtiments n'est plus à prouver, mais cela est surtout vrai pour les nouvelles constructions. Les PACG dites « conventionnelles » ne permettent pas de produire de la chaleur à une température suffisamment élevée pour assurer la compatibilité avec les systèmes de chauffage des bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Toutefois, près de la moitié des écoles québécoises en sont équipées. Il y a donc un besoin urgent de trouver une solution pour décarboner efficacement ces bâtiments.

Les pompes à chaleur haute température (PACHT) présentent un intérêt en ce sens. Il s'agit d'une technologie déjà utilisée en milieu industriel pour répondre à des besoins thermiques de procédés pouvant atteindre 160 °C. La littérature rapporte toutefois très peu d'études sur

le couplage d'une PACT avec un échangeur géothermique pour décarboner des bâtiments. Le présent projet de maîtrise vise à combler cette lacune en évaluant le potentiel des pompes à chaleur géothermiques haute température (PACGHT) pour décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température.

Une étude de cas est réalisée sur un prototype d'école primaire de 1640 m² représentatif du parc de bâtiments de cette typologie au Québec. L'école est localisée à Montréal et présente une charge de chauffage maximale de 200 kW. Huit scénarios sont modélisés dans TRNSYS :

- Chaudière au gaz naturel. Scénario représentant le bâtiment existant (avant rétrofit). Le chauffage est assuré par des émetteurs de chaleur à haute température (82 °C).
- Chaudière électrique. La chaudière au gaz existante est remplacée par une chaudière électrique de capacité équivalente.
- PACG. La chaudière au gaz existante est remplacée par une PACG et des émetteurs de chaleur à basse température (50 °C) remplacent les émetteurs existants.
- PACG hybride. Scénario similaire au précédent à la différence que la PACG ne couvre que partiellement les charges de chauffage et qu'une chaudière au gaz naturel assure l'appoint.
- PACGHT. La chaudière au gaz existante est remplacée par une PACGHT et les émetteurs existants sont conservés.
- PACGHT hybride. Scénario similaire au précédent à la différence que la PACGHT ne couvre que partiellement les charges de chauffage et qu'une chaudière au gaz naturel assure l'appoint.
- PACGHT hybride GNR. Scénario identique au précédent à la différence que du gaz naturel renouvelable (GNR, aussi appelé gaz de source renouvelable, GSR) est consommé plutôt que du gaz naturel fossile.
- PACGHT biénergie. Scénario similaire à PACGHT hybride à la différence que le chauffage d'appoint est géré selon la tarification biénergie d'Hydro-Québec.

Les scénarios géothermiques incluent de 2 à 4 puits à colonne permanente (PCP), selon le scénario, un système semi-ouvert qui utilise directement l'eau souterraine afin d'échanger de la chaleur plus efficacement avec le sol. La réponse thermique des PCP est dynamiquement couplée au modèle énergétique du bâtiment grâce à un algorithme de convolution stationnaire dans le domaine spectral et à des fonctions de transfert générées numériquement.

Les performances environnementale, énergétique et économique des scénarios sont évaluées. Bien qu'une substitution de la chaudière au gaz naturel existante par une chaudière électrique permette de décarboner l'école à 86%, ce scénario multiplie la puissance maximale appelée par plus de 6. L'utilisation d'une PACG présente un SCOP de 3.52 contre 2.24 pour une PACGHT qui doit opérer à des températures au condenseur plus élevées. À températures

d'opération égales, la PACG demeure plus efficace que la PACGHT en raison du réfrigérant et du type de compresseur présents dans les produits réels modélisés pour les fins de cette étude. Les scénarios PACG et PACGHT présentent des réductions des émissions de GES respectives de 91% et 90%.

Les scénarios PACG et PACGHT hybrides présentent des SCOP et des intensités énergétiques (IÉ) similaires à leurs homologues tout-à-l'électricité (TAÉ). Le système géothermique hybride couvre 60% de la charge maximale de chauffage, ce qui répond à environ 95% des besoins annuels de chauffage. L'appoint au gaz naturel comble les 5% restants par grands froids, ce qui limite la puissance maximale appelée tout en ayant un impact négligeable (3%) sur le niveau de décarbonation atteint et en réduisant l'investissement initial de 17% à 25%. Au niveau de la performance économique, le scénario PACGHT hybride se démarque avec une période de retour sur investissement (PRI) de 6 ans et une valeur actualisée nette (VAN) sur 25 ans de 463 000\$. Ces résultats s'expliquent par un investissement initial réduit d'environ 200 000\$ en raison de la réutilisation des émetteurs de chaleur à haute température existants et de l'aménagement d'un PCP de moins par rapport au scénario PACG hybride. Le scénario PACGHT biénergie présente une VAN encore plus élevée de 529 000\$, mais au détriment du niveau de décarbonation atteint (65% par rapport à environ 90% pour les autres scénarios). L'utilisation du GNR affecte de manière négligeable les émissions de GES du scénario PACGHT hybride en raison des faibles volumes de gaz consommé.

L'implantation d'une PACGHT lors du rétrofit d'écoles existantes offre également d'autres avantages. Les travaux à l'intérieur sont localisés dans la salle mécanique, ce qui évite de perturber l'occupation et ce qui offre la possibilité de réaliser le projet en dehors des vacances estivales scolaires. La climatisation peut potentiellement être intégrée dans le même projet. La conservation d'un chauffage à haute température pourrait être un atout dans les bâtiments patrimoniaux. Il est aussi possible de produire de l'eau chaude domestique à 60 °C.

Cette étude a confirmé le potentiel des PACGHT pour décarboner efficacement et rapidement les bâtiments institutionnels québécois munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Bien que cette solution n'offre pas la meilleure performance énergétique absolue, ni la meilleure rentabilité financière, elle réalise un compromis entre ces deux aspects en décarbonant mieux que la biénergie et en étant plus intéressante économiquement que les PACG conventionnelles à basse température. Elle offre en outre des avantages pratiques uniques par rapport aux autres solutions. De manière plus générale, ces conclusions pourraient s'appliquer à de nombreux bâtiments chauffés par un système hydronique à haute température alimenté par une chaudière au gaz naturel en climat froid avec une consommation énergétique fortement dominée par le chauffage des espaces.

ABSTRACT

Climate change has become a priority for governments around the world. Quebec aims to be carbon-neutral by 2050, which will require a rapid decarbonization of the economy. Particular attention is being paid to the building sector. It contributes 10% of the province's greenhouse gas (GHG) emissions, which may seem low compared to the industrial and transportation sectors. Together, they account for 58% of GHG emissions. However, buildings limit the ability to electrify, and therefore decarbonize, these other key sectors. They are responsible for 50% of the peak electricity demand on the provincial grid during winter peak periods due to the high heating demand generated by a cold climate. This is due to the large share of resistive electric heating in building systems.

In the race to decarbonize, the institutional building sector is lagging behind. 45% of Quebec schools are still heated by gas boilers. It is important to electrify them efficiently to mitigate the problem of peak electricity demand. Heat pumps (HP) are a promising and proven option to achieve this. The vast majority of HPs installed in Quebec are air-source heat pumps (ASHP). Although an attractive seasonal coefficient of performance (SCOP) can generally be achieved, ASHPs suffer a drop in performance and capacity when extreme cold occurs. That is when power demand becomes a problem and other alternatives must be considered.

A ground-source heat pump (GSHP) meets this challenge by extracting heat from the ground, where the temperature is relatively constant throughout the year. The potential of this solution to mitigate the impact of decarbonization on peak electricity demand has been demonstrated, but this is especially true for new buildings. Conventional GSHPs cannot produce heat at temperatures high enough to ensure compatibility with heating systems in existing buildings equipped with high-temperature radiators. However, almost half of Quebec's schools are equipped with them. There is therefore an urgent need to find a solution to effectively decarbonize these buildings.

High temperature heat pumps (HTHP) are an interesting option. This technology is already used in industrial environments to meet the thermal needs of processes that can reach over 160 °C. However, there is very little literature studying the coupling HTHPs with geothermal heat exchangers to decarbonize buildings. This master's thesis aims to fill this gap by assessing the potential of high-temperature ground-source heat pumps (HTGSHP) to decarbonize existing buildings equipped with high-temperature heat emitters.

A case study is carried out on a 1640 m² elementary school prototype representative of the building stock of this typology in Quebec. The school is located in Montreal and has a

maximum heating load of 200 kW. 8 scenarios are modeled using TRNSYS software:

- Gas boiler. Scenario representing the existing building (before retrofit). Space heating is provided by high-temperature radiators (82 °C).
- Electric boiler. The existing gas boiler is replaced by an electric boiler of equivalent capacity.
- GSHP. The existing gas boiler is replaced by a GSHP, and low-temperature (50 °C) heat emitters replace the radiators.
- Hybrid GSHP. This scenario is similar to the previous one, but the GSHP covers 60% of the maximum heating load. The existing gas boiler serves as an auxiliary heating source.
- HTGSHP. The existing gas boiler is replaced by a HTGSHP, and the existing radiators are retained.
- Hybrid HTGSHP. This scenario is similar to the previous one, but the HTGSHP covers 60% of the maximum heating load. The existing gas boiler serves as an auxiliary heating source.
- Hybrid HTGSHP RNG. Same scenario as above, except that renewable natural gas (RNG) is used instead of fossil natural gas.
- HTGSHP dual energy. Similar scenario as Hybrid HTGSHP, except that auxiliary heating is managed according to the specific "dual energy" rules and rate structures offered by the gas and electricity utilities in Québec.

All geothermal scenarios include 2 to 4 standing column wells (SCW), depending on the scenario, a semi-open system that uses groundwater directly to exchange heat more efficiently with the ground. The thermal response of SCWs is dynamically coupled to the building's energy model using a stationary convolution algorithm in the spectral domain and numerically generated transfer functions.

The environmental, energy and economic performance of the scenarios are evaluated. Although replacing the existing gas boiler with an electric boiler would decarbonize the school at 86%, this scenario multiplies the peak power demand by more than 6. Using a GSHP gives a SCOP of 3.52, compared with 2.24 for a HTGSHP, which has to operate at higher condenser temperatures. At equal temperatures, the GSHP remains more efficient than the HTGSHP due to the refrigerant and compressor used. The GSHP and HTGSHP scenarios offer GHG emission reductions of 91% and 90% respectively.

The Hybrid GSHP and Hybrid HTGSHP scenarios have SCOPs and energy use intensities (EUI) that are similar to those of their fully electric counterparts. The hybrid geothermal system covers 60% of the maximum heating load, which meets around 95% of annual heating needs. The auxiliary gas heating provides the remaining 5% during cold weather. This limits

peak power demand while having a negligible impact (3%) on the level of decarbonization achieved and reducing the initial investment (CAPEX) by between 17% and 25%. In terms of economic performance, the Hybrid HTGSHP scenario stands out with a return on investment (ROI) of 6 years and a net present value (NPV) after 25 years of \$463 000. These results can be explained by CAPEX reduction of around \$200 000 due to the reuse of existing radiators and the installation of one less SCW compared with the Hybrid GSHP scenario. The HTGSHP dual energy scenario presents an even higher NPV of \$529 000, but at the expense of the level of decarbonization achieved (65% compared with around 90% for the other scenarios). The use of RNG has a negligible impact on GHG emissions in the Hybrid HTGSHP scenario, due to the low gas consumption.

Installing a HTGSHP when retrofitting existing schools also has other advantages. The indoor interventions are carried out in the mechanical room only, thereby reducing occupant disruptions and enabling the project to take place outside the school summer break. Cooling can potentially be integrated into the same project. In heritage buildings, retaining high-temperature heating could be an asset. It is also possible to produce domestic hot water at 60 °C.

This study confirmed the potential of HTGSHP to quickly and efficiently decarbonize Quebec institutional buildings equipped with high-temperature heat emitters. While this solution may not offer the best energy performance, nor the best financial return, it achieves a trade-off between these two aspects. It offers a better level of decarbonization than the dual energy scenario while being more economically attractive than conventional low-temperature GSHPs. Moreover, it offers unique practical advantages over other solutions. Generally speaking, these conclusions could be applied to buildings heated by a high-temperature hydronic system fed by a gas boiler in cold climates where the energy consumption is strongly dominated by space heating.

Further details are available in a peer-reviewed conference article written in English [1].

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	viii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
LISTE DES ANNEXES	xix
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs	2
1.2 Plan du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 État de la décarbonation des bâtiments au Québec	4
2.2 Pompes à chaleur géothermiques	5
2.3 Décarbonation des bâtiments existants munis d'émetteurs à haute température	8
2.4 Pompes à chaleur haute température	10
2.5 Synthèse	12
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	14
3.1 Développement du modèle de référence	14
3.1.1 Géométrie et zonage	14
3.1.2 Enveloppe du bâtiment et infiltration	15
3.1.3 Gains internes et ventilation	16
3.1.4 Eau chaude domestique	16
3.1.5 Système CVCA de référence	17
3.2 Modélisation et couplage des puits à colonne permanente	20
3.2.1 Fonction de transfert	21
3.2.2 Convolution stationnaire	22

3.2.3	Dimensionnement de l'échangeur géothermique	23
3.3	Scénarios décarbonés	24
3.3.1	Chaudière électrique	25
3.3.2	PACG conventionnelle	26
3.3.3	PACG conventionnelle hybride	29
3.3.4	PACGHT	30
3.3.5	PACGHT hybride	32
3.3.6	PACGHT hybride avec gaz naturel renouvelable	33
3.3.7	PACGHT biénergie	33
3.4	Intensité carbone des sources énergétiques	33
3.5	Analyse économique	34
3.5.1	Investissement initial	34
3.5.2	Subventions	35
3.5.3	Tarification de l'électricité	36
3.5.4	Tarification du gaz naturel	37
3.5.5	Valeur actualisée nette	39
3.5.6	Période de retour sur investissement	40
CHAPITRE 4 PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET ÉNERGÉTIQUE		41
4.1	Décarbonation et puissance maximale appelée	41
4.2	Intensité énergétique	43
4.3	Coefficients de performance	45
4.4	Synthèse	48
CHAPITRE 5 PERFORMANCE ÉCONOMIQUE		50
5.1	Investissement initial	50
5.2	Coûts énergétiques	52
5.3	Valeur actualisée nette	53
5.4	Période de retour sur investissement	56
5.5	Sensibilité à l'inflation	56
5.6	Sensibilité aux subventions	57
5.7	Synthèse	60
CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE		61
6.1	Considérations pratiques	61
6.2	Performance globale	65
6.3	Comparaison avec la littérature	71

6.4 Synthèse	73
CHAPITRE 7 CONCLUSION	74
7.1 Synthèse des contributions	74
7.2 Recommandations et perspectives	77
RÉFÉRENCES	80
ANNEXES	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques de l’enveloppe de l’école primaire	15
Tableau 3.2	Gains internes et ventilation par type de zone	16
Tableau 3.3	Conditions de conception de la PACG	27
Tableau 3.4	Conditions de conception de la PACGHT	30
Tableau 3.5	Coûts détaillés du gaz naturel fossile et renouvelable	38
Tableau 4.1	Intensité énergétique	43
Tableau 4.2	SCOP et SCOP _s	45
Tableau 5.1	Résultats de l’analyse économique avec subventions	50
Tableau 5.2	Investissement initial détaillé	51
Tableau 5.3	Sensibilité des VAN à l’inflation	57
Tableau 5.4	Subventions détaillées	58
Tableau 5.5	Résultats de l’analyse économique sans subventions	59
Tableau 6.1	Comparaison des caractéristiques techniques et économiques des scénarios géothermiques hybrides	68

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Types d'échangeurs géothermiques de basse température	6
Figure 2.2	Recherche et développement sur les PACHT selon l'AIE	10
Figure 2.3	Classification des PAC selon les températures au condenseur et à l'éva- porateur	11
Figure 3.1	Géométrie et zonage de l'école primaire	14
Figure 3.2	Schéma CVCA simplifié du scénario chaudière au gaz (école existante)	17
Figure 3.3	Courbe de chauffage des émetteurs de chaleur à haute température .	18
Figure 3.4	Charges de chauffage de l'école primaire	18
Figure 3.5	Stratégie de modélisation employée	21
Figure 3.6	Scénarios étudiés	24
Figure 3.7	Schéma CVCA simplifié du scénario chaudière électrique	25
Figure 3.8	Schéma CVCA simplifié du scénario PACG	26
Figure 3.9	Cartes de performance de la PACG et de la PACGHT	27
Figure 3.10	Courbe de chauffage des émetteurs de chaleur à basse température . .	28
Figure 3.11	Schéma CVCA simplifié du scénario PACG hybride	29
Figure 3.12	Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT	31
Figure 3.13	Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT hybride	32
Figure 4.1	Émissions annuelles de GES et puissance électrique maximale appelée	41
Figure 4.2	Intensité énergétique détaillée par poste de consommation	44
Figure 4.3	Distribution du COP selon la température à la sortie du condenseur pour les scénarios PACG et PACGHT	46
Figure 5.1	Coûts énergétiques annuels	52
Figure 5.2	Évolution des VAN sur 25 ans	54
Figure 6.1	Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT hybride avec climatisation	63

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
ATC	Accumulateur thermique centralisé
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
DDC	Commande numérique directe
ECD	Eau chaude domestique
GES	Gaz à effet de serre
GNR	Gaz naturel renouvelable
GSR	Gaz de source renouvelable
HQ	Hydro-Québec
MEQ	Ministère de l'Éducation du Québec
MERN	Ministère de l'énergie et des ressources naturelles
OSE	Outil de calcul Solutions Efficaces
PAC	Pompe à chaleur
PACG	Pompe à chaleur géothermique
PACGHT	Pompe à chaleur géothermique haute température
PACHT	Pompe à chaleur haute température
PBF	Puits en boucle fermée
PBO	Puits en boucle ouverte
PC	Point de consigne
PCP	Puits à colonne permanente
PI	Puits d'injection
PLR	Rapport de charge partielle
PRG	Potentiel de réchauffement global
RCP	Règlement sur les combustibles propres du Canada
RNA	Réseau de neurones artificiels
SO	Sous-objectif
SPEDE	Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission
TAÉ	Tout-à-l'électricité
TEQ	Transition Énergétique Québec
TRC	Thermique-résistif-capacitif
YUL	Aéroport International Montréal-Trudeau

LISTE DES VARIABLES

a	Taux d'actualisation (%)
B	Puissance linéaire de l'émetteur aux conditions nominales ($btu/h/pi$)
C	Investissement supplémentaire (\$)
C_p	Chaleur spécifique du fluide ($btu/lb.\check{r}F$)
C_s	Coefficient d'effet de cheminée (-)
C_w	Coefficient d'effet du vent (-)
CAPEX	Investissement initial (\$)
COP	Coefficient de performance (-)
D	Densité du fluide (lb/pi^3)
E_z	Efficacité de distribution (-)
ELA	Surface de fuite effective (cm^2)
f_{he}	Débit volumique du fluide (USGPM)
FM	Flux monétaires annuels (\$)
i	Taux d'intérêt annuel du prêt (%)
i_e	Taux d'inflation annuelle de l'énergie (%)
IC	Intensité carbone (gCO_2e/MJ)
IÉ	Intensité énergétique (GJ/m^2)
k	Indice annuel (année)
L_{he}	Longueur de l'émetteur (pi)
LR50	Taux d'infiltration sous une différence de pression de 50 Pa ($L/s.m^2$)
n	Période considérée pour la VAN (année)
n_p	Durée d'amortissement du prêt (année)
OPEX	Coûts d'opération (\$)
PRI	Période de retour sur investissement (année)
\dot{Q}	Puissance thermique délivrée à la zone (btu/h)
\dot{Q}_f	Débit d'infiltration (m^3/s)
Q_g	Charge au sol (kW)
R_a	Taux d'air frais surfacique ($L/s.m^2$)
R_p	Taux d'air frais par personne ($L/s.p$)
R_{MF}	Ratio de mise de fonds (-)
SCOP	COP moyen de l'équipement de production de chaleur sur une saison de chauffage (-)
SCOP _s	COP moyen du système de production de chaleur sur une saison de chauffage (-)
SHGC	Coefficient de gain solaire (-)

t	Temps (année)
T_{air}	Température sèche de l'air dans la zone (°F)
$T_{\text{he,in}}$	Températures du fluide à l'entrée de l'émetteur (°F)
$T_{\text{he,out}}$	Températures du fluide à la sortie de l'émetteur (°F)
$T_{\text{alim,rad}}$	Température alimentée aux radiateurs (°C)
T_{amb}	Température ambiante (°C)
$T_{e,PCP}$	Température de l'eau à l'entrée des PCP (°C)
$T_{s,PCP}$	Température de l'eau à la sortie des PCP (°C)
U	Conductivité thermique ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
V	Vitesse du vent (m/s)
V_{oz}	Débit d'air frais (L/s)
VAN	Valeur actualisée nette (\$)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Détail des investissements initiaux	86
----------	---	----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Atteindre la neutralité carbone d’ici 2050 est essentiel pour atténuer les effets du changement climatique, entraînant une transition mondiale vers les sources d’énergie renouvelables. Au Québec, le réseau électrique est déjà décarboné, avec une intensité carbone cycle-de-vie de $9.6 \text{ gCO}_{2e}/MJ$, principalement grâce à une infrastructure hydroélectrique étendue [2]. Par conséquent, l’électrification constitue la stratégie privilégiée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Cependant, cette transition exerce une pression croissante sur le réseau de production et de distribution d’électricité. Lors des périodes de pointe hivernales, lorsque les températures ambiantes peuvent descendre sous $-26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à Montréal [3], le chauffage des bâtiments représente à lui seul plus de la moitié de la demande électrique (kW) sur le réseau d’Hydro-Québec, limitant ainsi la capacité à décarboner d’autres secteurs économiques. Bien que les bâtiments ne constituent que 10% des émissions totales de GES de la province, ils ne peuvent être négligés dans l’effort global visant à atteindre la neutralité carbone [4].

Si les pompes à chaleur (PAC) aérothermiques constituent une solution prometteuse pour réduire la demande énergétique des bâtiments dans de nombreuses régions du monde, les climats nordiques nécessitent des approches alternatives. En effet, les performances en aérothermie, tant en termes de coefficient de performance (COP) que de capacité de chauffage, diminuent considérablement à faible température ambiante, précisément lorsque les besoins de chauffage sont les plus élevés [5]. De nombreuses études ont mis en évidence le potentiel des pompes à chaleur géothermiques (PACG) pour réduire les charges électriques de pointe en climat froid [5–7]. Les PACG conventionnelles produisent de la chaleur à basse température ($<50 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui les rend particulièrement adaptées aux nouvelles constructions, où les émetteurs de chaleur peuvent être conçus pour répondre aux besoins thermiques avec des fluides à basse température. Toutefois, la plupart des bâtiments nécessitant une décarbonation sont déjà construits [8]. Beaucoup fonctionnent encore avec des chaudières aux combustibles fossiles qui produisent généralement de la chaleur à haute température pour alimenter des émetteurs de chaleur qui ne peuvent pas satisfaire la demande de chauffage du bâtiment avec un fluide à basse température. Cette contrainte est particulièrement présente dans de nombreux bâtiments institutionnels, dont certains sont des édifices patrimoniaux. Cette limitation entrave donc la décarbonation efficace de ces bâtiments en climat froid.

Plusieurs stratégies ont été proposées dans la littérature pour relever ce défi. Une approche répandue consiste à remplacer tous les émetteurs de chaleur haute température par des alternatives à basse température compatibles avec les températures d’opération des PAC

conventionnelles. Toutefois, cette solution s'avère souvent coûteuse et intrusive pour les occupants [9]. Lammle et al. ont proposé une analyse pièce par pièce des émetteurs de chaleur existants afin d'identifier et de ne remplacer que ceux qui sont critiques pour abaisser la température du réseau de chauffage [10]. Leur étude a montré qu'il était parfois possible de réduire la température d'alimentation de 20 °C tout en remplaçant seulement 7% des émetteurs. Cependant, ils ont également démontré que le potentiel de cette approche dépend fortement des rénovations de l'enveloppe du bâtiment et de la capacité nominale des émetteurs existants. Dans leur étude, trois des cinq bâtiments analysés nécessitaient le remplacement de presque tous les émetteurs pour permettre l'intégration d'une PAC conventionnelle. De manière similaire, Childs et al. ont développé un modèle prédictif basé sur les données de 4 600 bâtiments chauffés par des chaudières au gaz naturel afin d'évaluer leur potentiel de rétrofit [11]. Ils ont estimé que 31% des bâtiments au Royaume-Uni pouvaient accueillir une PAC produisant de la chaleur à 55 °C, cette proportion augmente à 71% pour une production à 65 °C. Cela implique que 29% des bâtiments nécessiteraient le remplacement des émetteurs pour être compatibles avec une PAC ou que celle-ci produise de la chaleur à plus haute température.

Les pompes à chaleur haute température (PACHT) répondent à ce besoin. Elles sont traditionnellement utilisées pour satisfaire des besoins de chauffage industriels allant jusqu'à 160 °C en exploitant une source de chaleur. Arpagaus et al. ont identifié plus de 20 modèles issus de 13 fabricants différents capables de produire de la chaleur à plus de 90 °C [12]. Certaines PACHT peuvent même atteindre des écarts de température de 100 °C entre l'évaporateur et le condenseur grâce à des cycles thermodynamiques avancés. Les recherches actuelles se concentrent sur l'atteinte de températures au condenseur plus élevées tout en intégrant des réfrigérants à faible potentiel de réchauffement global (PRG) [13]. Pourrait-on utiliser les PACHT pour décarboner efficacement les bâtiments institutionnels existants? C'est la question à laquelle ce projet de maîtrise veut répondre.

1.1 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer le potentiel d'une PACGHT pour décarboner les bâtiments existants équipés d'émetteurs de chaleur à haute température en climat froid. Cet objectif se divise en trois sous-objectifs :

- Sous-objectif 1 (SO1) : développer des outils pour la modélisation couplée des PACGHT et des PCP.
- Sous-objectif 2 (SO2) : évaluer et comparer les performances environnementale et énergétique des PACGHT avec d'autres scénarios décarbonés.
- Sous-objectif 3 (SO3) : évaluer et comparer la performance économique des PACGHT

avec d'autres scénarios décarbonés.

1.2 Plan du mémoire

Au chapitre 2, une revue de littérature sera effectuée en mettant l'accent sur l'état de la décarbonation des bâtiments au Québec, sur le rôle clé que peut jouer la géothermie pour atteindre la carboneutralité, sur les méthodes actuellement reconnues pour réduire les émissions de GES des bâtiments existants et sur les applications des PACHT. Le chapitre 3 présentera les outils de modélisation développés pour une étude de cas réalisée sur un prototype d'école primaire (SO1). Les performances environnementale et énergétique d'une PACGHT seront comparées à celles de d'autres scénarios décarbonés au chapitre 4 (SO2). Le chapitre 5 traitera quant à lui de la performance économique d'une PACGHT comparativement aux autres scénarios. Le chapitre 6 discutera de la performance globale des scénarios décarbonés à l'étude en plus d'aborder les considérations pratiques entourant l'implantation et l'opération d'une PACGHT. Finalement, le chapitre 7 conclura cette étude en présentant une synthèse des principaux résultats accompagnés de recommandations à l'intention des concepteurs et des donneurs d'ouvrage impliqués dans la décarbonation des bâtiments au Québec. Des perspectives de recherche seront également formulées afin d'accélérer le déploiement des PACGHT comme solution de décarbonation des bâtiments existants.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 État de la décarbonation des bâtiments au Québec

Au Québec, les bâtiments sont responsables de seulement 10% des émissions de GES en raison d’une électrification massive de ce secteur [4]. Alors, pourquoi s’en préoccuper autant lorsque vient le temps de parler de l’atteinte de la carboneutralité en 2050 ? Il se trouve que cette électrification massive, et plus particulièrement l’emploi de systèmes de chauffage à résistance électrique, engorge les infrastructures de production et de distribution électriques en période de pointe hivernale. En effet, les bâtiments sont responsables d’environ 50% de la puissance maximale appelée en période de grands froids [14]. Cela limite le potentiel d’électrification des autres secteurs économiques qui sont bien plus émetteurs que les bâtiments. Mentionnons par exemple les secteurs du transport et industriel qui, à eux deux, représentent 58% des émissions de GES de la province.

Selon les données de la base de données complète sur la consommation d’énergie de Ressources Naturelles Canada [15], en 2022, l’électricité représente 77% de la consommation énergétique des bâtiments du secteur résidentiel québécois. Le bois est la deuxième source d’énergie dominante dans ce secteur avec 11% alors que le gaz naturel arrive en troisième place avec à peine 8%. L’intensité énergétique (IÉ) moyenne de ce secteur est de 0.68 GJ/m². Dans le secteur commercial/institutionnel, le portrait est différent avec 62% de la consommation énergétique qui est électrique. Le gaz naturel représente la deuxième source énergétique avec 31% de l’énergie de ce secteur. L’IÉ moyenne de ce secteur est de 1.49 GJ/m², soit environ le double du résidentiel. L’intensité carbone (IC) de l’énergie du secteur commercial/institutionnel est de 20.2 t_{CO_2e}/TJ , soit environ le double du résidentiel (9.2 t_{CO_2e}/TJ). C’est donc dire qu’un m² d’un bâtiment commercial/institutionnel émet approximativement autant de GES que quatre m² d’un bâtiment résidentiel. Il y a donc un grand intérêt à accentuer les efforts en décarbonation dans ce secteur.

Les écoles sont incluses dans le secteur commercial/institutionnel. Leur portrait est encore moins reluisant. En effet, les écoles québécoises présentent une IC de 23.7 t_{CO_2e}/TJ . Le gaz naturel comble 38% des besoins énergétiques de ce secteur. Selon des données du Ministère de l’énergie et des ressources naturelles (MERN) datant de l’année 2016-2017 et recensant 3300 écoles québécoises, 1480 écoles (45 %) utilisent le gaz naturel comme source d’énergie principale pour le chauffage [16]. Vanroy a étudié les configurations CVCA typiques présentes dans les écoles du Québec et a conclu que la plupart utilise une chaudière centrale alimentant des émetteurs de chaleur par le biais d’un réseau de chauffage hydronique. Lorsqu’une école

n'est pas munie de chaudière centrale, elle est bien souvent munie de plinthes électriques dans les zones [17]. Ainsi, une école chauffée par une chaudière au gaz naturel centralisée alimentant des émetteurs de chaleur à haute température dans les zones est la configuration la plus souvent rencontrée. Ces bâtiments doivent être décarbonés tout en limitant la puissance électrique maximale appelée.

2.2 Pompes à chaleur géothermiques

De nombreuses approches existent pour réduire les émissions de GES des bâtiments. Au Québec, l'électrification est l'approche privilégiée en raison de la faible IC de la ressource ($9.6 \text{ gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$) [2]. Cependant, lorsque cela est fait avec des systèmes résistifs (ayant un COP de 1), cela se traduit par une forte puissance électrique maximale appelée. Une pompe à chaleur (PAC) représente une solution intéressante pour mitiger cet appel de puissance, puisqu'en puisant une partie de l'énergie de chauffage dans l'air ambiant ou le sol, elle permet d'utiliser moins d'électricité et donc de conduire à une demande de pointe moins grande. Les PAC sont déjà largement utilisées à cette fin et plus particulièrement les PAC aérothermiques qui échangent de la chaleur avec l'air ambiant. Ces dernières sont une mesure de décarbonation efficace. Elles sont toutefois moins bien adaptées aux climats froids tels que celui du Québec puisque leur COP et leur capacité en chauffage chutent lorsque la température ambiante se refroidit, précisément au moment où les besoins de chauffage sont les plus élevés [5, 18]. Les pompes à chaleur géothermiques (PACG) sont ainsi mieux adaptées aux climats froids étant donné qu'elles puisent leur chaleur dans le sol qui ne subit pas les fluctuations de température importantes de l'air ambiant. En période de pointe hivernale, il y a un gain important à puiser de l'énergie géothermique puisque la puissance électrique maximale appelée est grandement réduite. [6, 19].

L'échangeur géothermique est une composante essentielle d'un système géothermique. Il est couplé à la PACG pour assurer le chauffage ou le refroidissement d'un bâtiment. Il existe trois types principaux d'échangeurs géothermiques de basse température (voir figure 2.1) [5] :

- Les puits en boucle fermée (PBF) sont les plus répandus, mais également les plus dispendieux à construire. Un fluide caloporteur circule dans une tuyauterie en circuit fermé installée dans des forages. La chaleur est échangée avec l'environnement géologique par conduction. Ce type d'échangeur géothermique est peu compact en raison des limitations sur la profondeur des puits et d'une faible puissance unitaire.
- À l'autre bout du spectre, on retrouve les puits en boucle ouverte (PBO) où de l'eau souterraine est prélevée dans un puits de pompage avant d'être entièrement retournée à l'aquifère via un puits d'injection (PI). Ils présentent la plus grande puissance unitaire

(W/m) en raison de l'advection d'eau souterraine qui constitue le mode de transfert de chaleur principal. À puissance égale, il s'agit du type d'échangeurs géothermiques le moins dispendieux à aménager. Toutefois, des conditions hydrogéologiques favorables sont requises, mais rarement disponibles dans les zones urbaines denses où la majorité des projets de décarbonation se concentrent. Ils présentent également des risques de colmatage [20]. Pour ces raisons, ils sont peu répandus au Québec.

- À mi-chemin entre les PBF et les PBO, on retrouve les puits à colonne permanente (PCP). Il s'agit d'un échangeur géothermique semi-ouvert. L'eau souterraine est utilisée directement comme fluide caloporteur. À charge partielle, elle est pompée et injectée dans le même puits, soit le PCP [21]. Les transferts thermiques avec le sol s'opèrent par conduction et par advection ce qui permet d'atteindre des puissances unitaires intéressantes. À pleine charge, un processus appelée « saignée », où une fraction (typiquement de 10% à 30%) du débit pompé est réinjectée dans le PI plutôt que dans le PCP, est activé. Un rabattement du niveau d'eau est ainsi généré dans les PCP ce qui augmente grandement les effets advectifs (venues d'eau souterraine au puits). Cela se traduit par des coûts de construction et d'opération plus faibles que les PBF [22]. Selon une étude récente menée dans une école québécoise, les PCP peuvent réduire de 73% la longueur totale forée et conséquemment de 50% le coût de construction de l'échangeur géothermique comparativement à des PBF [7]. Un échangeur géothermique constitué de PCP est donc plus compact qu'un échangeur constitué de PBF, ce qui en fait une solution propice à la décarbonation des bâtiments existants en milieu urbain dense où les terrains sont exigus [23]. De plus, ils peuvent être aménagés dans un éventail de conditions hydrogéologiques beaucoup plus vastes que les PBO, ce qui leur confère un grand potentiel de déploiement.

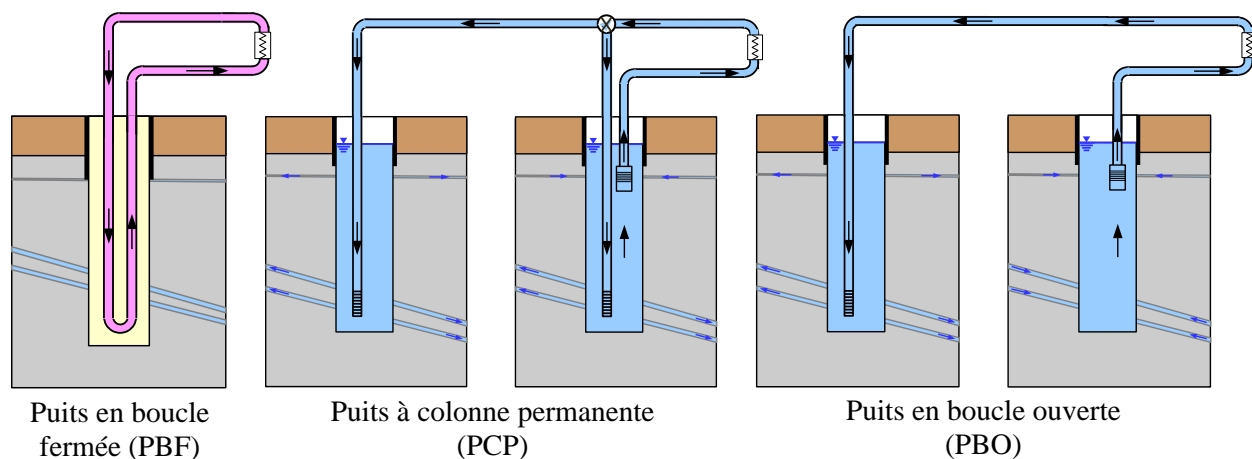


FIGURE 2.1 Types d'échangeurs géothermiques de basse température, figure adaptée de [24]

Pour qu’une PACG soit performante, il est essentiel que son échangeur géothermique soit dimensionné adéquatement. Il s’agit de déterminer la longueur totale et la configuration de l’échangeur géothermique requises pour répondre aux charges de chauffage et de climatisation du bâtiment tout en demeurant dans une plage de température acceptable. Un échangeur géothermique trop court excédera les limites d’opération de la PACG et entraînera son mal-fonctionnement. Un échangeur géothermique trop long ne sera pas rentable [5]. Il existe différentes approches pour dimensionner un échangeur géothermique [23] :

- Les solutions analytiques (source linéique infinie, source cylindrique infinie, source linéique finie, etc.)
- Les modèles thermique-résistif-capacitifs (TRC)
- Les modèles numériques
- Les réseaux de neurones artificiels (RNA) [25]

Toutes ces approches sont utilisées pour les PBF avec une grande dominance des solutions analytiques pour leur bon équilibre entre temps de calcul et précision. Pour les PCP, en raison de la complexité des transferts thermiques, il n’existe actuellement pas de solution analytique validée pour dimensionner un champ constitué de plusieurs puits. De récentes études se sont penchées sur cette question, mais les modèles développés s’appliquent à un seul PCP [26, 27]. L’approche de modélisation numérique par éléments finis est privilégiée jusqu’à présent pour dimensionner un échangeur géothermique constitué de plusieurs PCP. Cela est toutefois demandant en termes de ressources de calculs. Des recherches sont menées actuellement afin d’entraîner des RNA pour la simulation rapide de fonctions de transfert de PCP en milieu hétérogène [25].

Toutes les approches décrites jusqu’à présent supposent que la charge au sol est constante dans le temps. Or, ces charges fluctuent, en réalité, au gré des charges de chauffage et de refroidissement du bâtiment. Le principe de superposition temporelle permet de réconcilier un patron de charge variable avec ces méthodes de calculs supposant une charge constante. Pour les PCP, cette réconciliation se fait généralement en deux étapes :

- Une fonction de transfert, soit la réponse thermique d’un échangeur géothermique à une impulsion de charge unitaire et constante, est générée par un modèle numérique par éléments finis [28].
- Cette fonction de transfert est convoluée dans le domaine spectral avec les charges variables au sol [29].

Cette approche a été utilisée à maintes reprises avec succès dans la littérature pour dimensionner et simuler des PCP. Elle permet de réduire significativement le temps de calcul par rapport à une pleine modélisation numérique à charge variable [30, 31].

Une fois l’échangeur géothermique bien dimensionné, un problème demeure : la plupart des

PACG disponibles sur le marché québécois produisent de la chaleur à moins de 50 °C [32]. Dans le cas de constructions neuves, cela n'est pas un enjeu puisque le chauffage des espaces peut être conçu pour se faire à basse température, avec de l'air chaud, des planchers radiants ou avec des émetteurs de chaleur à basse température. L'histoire est tout autre dans des bâtiments existants où on retrouve bien souvent des chaudières aux combustibles fossiles qui alimentent des réseaux hydroniques couplés à des émetteurs de chaleur à haute température. La décarbonation de tels bâtiments reste donc un défi, et la section suivante présente la littérature qui a été recensée à ce sujet.

2.3 Décarbonation des bâtiments existants munis d'émetteurs à haute température

Différentes approches sont présentées dans la littérature afin de décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Ces approches sont répertoriées en deux grandes catégories.

La première catégorie présente des stratégies permettant d'intégrer une PAC conventionnelle, qu'elle soit géothermique ou aérothermique :

- Abaisser les températures du réseau hydronique en remplaçant tous les radiateurs par de nouvelles unités à basse température. Une importante rénovation est cependant nécessaire pour installer des émetteurs de chaleur à basse température (du plancher radiant, des convecteurs à basse température ou des serpentins de chauffage à rangées multiples) [9]. Ces modifications importantes aux systèmes CVCA en place sont dispendieuses et perturbent souvent l'opération du système et les occupants [33]. Cette solution a été mise en place récemment dans un projet de démonstration de PCP en milieu scolaire québécois [7].
- Réaliser une analyse pièce par pièce des émetteurs de chaleur à haute température existants pour identifier les unités critiques à remplacer afin d'abaisser la température du réseau hydronique et ainsi assurer la compatibilité avec une PAC conventionnelle. Lammle et al. [10] présentent une étude de ce type pour des bâtiments multi-résidentiels. Leurs résultats montrent que cette approche est dépendante des rénovations de l'enveloppe du bâtiment et de la capacité nominale des émetteurs de chaleur existants dans chaque pièce. Ainsi, dans 60% des bâtiments présentés dans cette étude, presque tous les radiateurs devaient être remplacés. L'analyse pièce par pièce pour mettre en place cette solution est laborieuse et elle doit être réalisée dès le début du projet, au moment où les grandes orientations sont décidées.
- Analyser les données d'opération du bâtiment pour repérer un potentiel d'abaissement

de la température du réseau hydronique. Une étude au Royaume-Uni a analysé les données de 4 600 bâtiments chauffés par une chaudière au gaz naturel. Ils ont estimé que 31% de ces bâtiments étaient compatibles avec une PAC produisant un fluide à 55 °C sans avoir à remplacer les éléments de chauffage ou à rénover l’enveloppe du bâtiment [11].

- Comblent une partie du chauffage par l’air via un serpentins basse température et le reste via les émetteurs de chaleur existants en abaissant la courbe de chauffage. Cette solution fonctionne bien si le zonage des systèmes de ventilation est adéquat. Dans les écoles existantes du Québec, un problème récurrent est qu’un seul système de ventilation dessert bien souvent tout le bâtiment incluant des zones internes et des zones externes de différentes orientations solaires (si l’école est ventilée mécaniquement) [17]. L’air doit donc être alimenté à température neutre ou presque pour éviter la surchauffe de certaines zones telles que les zones internes qui sont en climatisation toute l’année.

La deuxième catégorie de solutions de décarbonation en présence d’émetteurs de chaleur à haute température est propre aux endroits où l’électricité est décarbonée, dont le Québec fait partie. Il s’agit de solutions d’électrification par effet Joule (chauffage électrique résistif). Il ne s’agit pas d’approches efficaces sur le plan énergétique comme c’est le cas pour la première catégorie qui intègre une PAC.

- Remplacer la chaudière aux combustibles fossiles par une simple chaudière électrique.
- Remplacer les émetteurs de chaleur à haute température par des plinthes électriques. Certaines compagnies se spécialisent dans le reconditionnement de radiateurs. Lors de cette opération, il est possible de remplir le radiateur d’une solution antigel et d’y immerger un élément chauffant électrique résistif. Une fois réinstallé, le radiateur est raccordé comme une plinthe électrique, et est déconnecté du réseau hydronique. Cette solution est surtout employée dans des édifices patrimoniaux [34].
- Combiner un chauffage électrique résistif avec du stockage thermique ou électrique. Cette solution permet d’électrifier complètement un bâtiment comme le ferait une chaudière électrique. Néanmoins, l’appel de puissance électrique est déplacé en dehors des périodes de pointe. En contexte institutionnel québécois, cette approche, et plus particulièrement l’utilisation d’accumulateurs thermiques centralisés (ATC), permet également de générer des économies sur les coûts de l’énergie par rapport à l’utilisation d’une chaudière électrique [35, 36].
- Installer un système hybride qui combine le gaz et l’électricité. Cette solution consiste à combler la majorité des besoins de chauffage avec une chaudière électrique et à n’opérer que le chauffage au gaz naturel (fossile ou renouvelable) lors des périodes hivernales de pointe où la puissance électrique maximale appelée est un enjeu. Ce type de systèmes

est particulièrement avantageux avec la tarification biénergie d'Hydro-Québec. Une étude récente a démontré que cette solution avec la tarification biénergie mène à une facture énergétique plus faible que l'utilisation d'un ATC. À moins que du gaz naturel renouvelable (GNR) ne soit utilisé, le niveau de décarbonation ne dépasse pas les 65% [36].

Dans la première catégorie employant des PAC pour le rétrofit efficace des bâtiments existants, aucune solution systématique, simple à mettre en oeuvre et sans impact sur les occupants n'est présentée. Dans la deuxième catégorie, les solutions présentées sont tributaires du niveau de décarbonation du réseau électrique et elles ne sont pas efficaces sur le plan énergétique. Comme l'a si bien dit Ursula Eicker, professeure en génie du bâtiment à l'université Concordia : « We need an approach to construction that transforms low-performing buildings into low-carbon buildings without disrupting their use. » [8]

2.4 Pompes à chaleur haute température

Les pompes à chaleur haute température (PACHT) sont une solution prometteuse pour répondre à ce besoin de décarbonation efficace des bâtiments existants sans affecter les occupants [32]. Cette technologie fait l'objet de recherche active afin de réduire la consommation d'énergie primaire et de décarboner la production de chaleur dans le secteur industriel. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) s'intéresse à cette technologie et un large projet de recherche internationale intitulé « Annex 58 High-Temperature Heat Pumps » est en cours [37]. Une feuille de route de la recherche dans ce secteur a été publiée (voir figure 2.2).

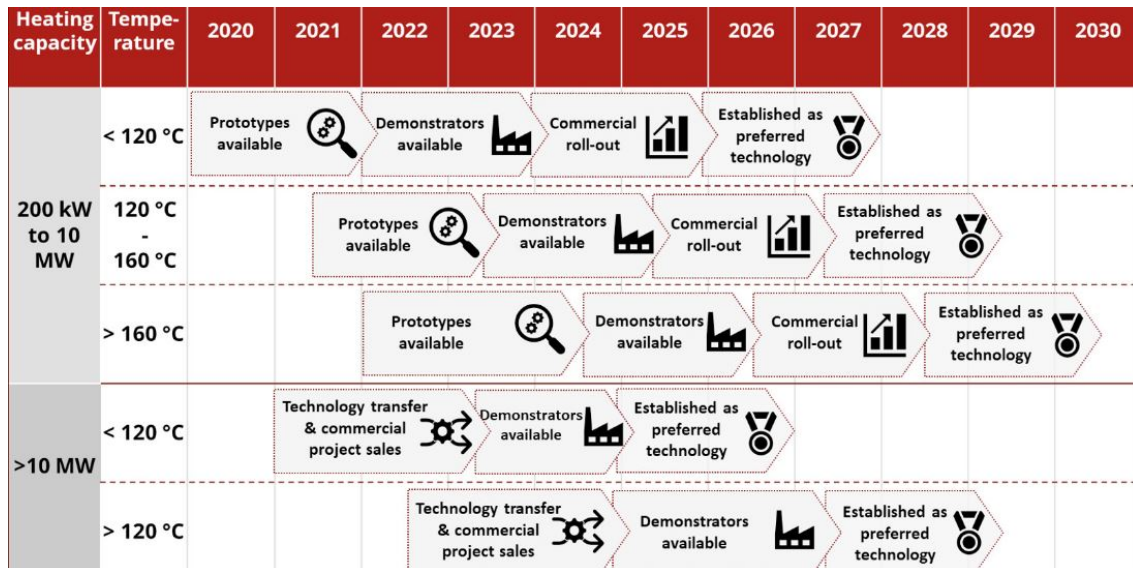


FIGURE 2.2 Recherche et développement sur les PACHT selon l'AIE, figure tirée de [37]

Les PAC peuvent être classifiées selon la température de la chaleur produite. Par définition, une PACHT se distingue d'une PAC conventionnelle par sa capacité à produire de la chaleur à plus de 80 °C (voir figure 2.3) [12]. Des recherches visent l'atteinte de températures de plus en plus élevées et l'utilisation de réfrigérants avec un faible PRG tels que les réfrigérants naturels [13]. Au Québec, des recherches sont menées sur les PACHT transcritiques au CO_2 avec éjecteur. Les résultats expérimentaux révèlent que l'éjecteur permet d'augmenter le COP de 15-18% et la puissance en chauffage de 16-20% par rapport à une PACHT sans éjecteur [9]. Certaines technologies en développement permettraient de produire un fluide à plus de 250 °C. On parlerait alors de pompes à chaleur à ultra haute température [38].

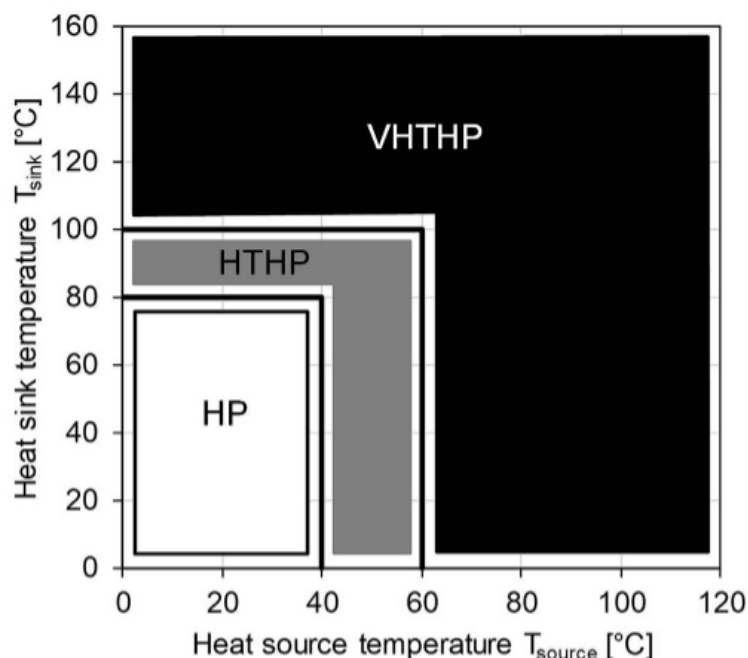


FIGURE 2.3 Classification des PAC selon les températures au condenseur et à l'évaporateur, figure tirée de [12]

Les applications pour les PACHT sont multiples bien qu'elles soient traditionnellement utilisées pour satisfaire des besoins de chauffage industriels allant jusqu'à 160 °C en exploitant une source de chaleur résiduelle [12]. Bellos et al. ont démontré le potentiel énergétique, environnemental et économique d'une PACHT aérothermique pour la décarbonation d'un bâtiment chauffé au mazout en Grèce en conservant les radiateurs existants [39]. Cette PAC utilise un réfrigérant R1234ze qui présente un PRG de 6 et qui est classifié A2L selon la norme CSA B52 [40]. La période de retour sur investissement (PRI) est de 6 années. Le COP moyen sur une saison de chauffage (SCOP) est de 2.0. Les auteurs identifient les énergies

solaire et géothermique comme pistes de recherche future pour améliorer les performances du système.

Les PACHT font aussi leur place pour décarboner les réseaux thermiques urbains (« District heating ») [41]. Barco-Burgos et al. ont identifié de multiples études où des PACHT étaient employées pour décarboner des réseaux thermiques urbains [42]. Dans certains cas, les PACHT atteignent des COP allant jusqu'à 6 lorsque des rejets thermiques servent de source de chaleur. Il arrive toutefois que des rejets thermiques ne soient pas disponibles et c'est là qu'il devient intéressant de se tourner vers d'autres sources d'énergie renouvelable. Une étude canadienne récente s'est penchée sur le couplage d'une PACGHT avec des puits coaxiaux de 2 km de profondeur pour satisfaire les besoins de chaleur d'un campus universitaire dont la charge de chauffage de pointe est évaluée à 51 MW [43]. Dans cette étude, Dickinson et al. ont évalué la performance énergétique d'un système à deux stages de compression en cascade pour produire un fluide à 95 °C avec différents réfrigérants présentant un faible PRG. Lorsque la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique est fixée à 30 °C et que du R1233zd(E) est employé, un SCOP de 3.0 est observé. Pour une température plus faible de 5 °C, un SCOP de 2.3 est obtenu. À cette même température, les auteurs ont démontré qu'un système à un stage engendrait une perte de performance de 20% par rapport à deux stages en cascade. Une autre étude suggère qu'une PAC et une PACHT en cascade permettent de produire de la chaleur à 82 °C à partir d'une source géothermique. Le COP est similaire (2.0) avec une PACGHT à un stage. Le coût du système en cascades est toutefois significativement réduit par rapport au système à un stage et ce, pour une même capacité de chauffage [44].

Une étude a recensé plus de 20 modèles issus de 13 fabricants différents capables de produire de la chaleur à plus de 90 °C [12]. Le marché des PACHT est plus développé en Europe et en Asie où la réglementation entourant la décarbonation est plus restrictive, mais également plus permissive à l'égard de l'inflammabilité des réfrigérants [32]. En Amérique du Nord, les PACHT commencent à arriver sur le marché. Le centre de recherche CanmetÉNERGIE de Ressources naturelles Canada, situé au Québec, a recensé au moins 10 manufacturiers de PACHT présents sur le marché nord-américain [44].

2.5 Synthèse

Ce chapitre a ciblé l'importance de trouver des solutions efficaces pour décarboner les bâtiments existants du Québec, et particulièrement les écoles, munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Il a été démontré que l'implantation d'une PACG conventionnelle constitue une approche performante en climat froid pour décarboner un bâtiment tout en limi-

tant la puissance maximale appelée sur le réseau électrique. Des travaux dispendieux, qui affectent l'occupation du bâtiment, sont néanmoins requis dans bien des cas. D'autres solutions existent, mais elles sont tantôt complexes, tantôt peu efficaces sur le plan énergétique et tantôt restreintes à des bâtiments présentant des caractéristiques bien particulières. Il n'existe donc pas de solution systématique et efficace pour décarboner une grande partie du parc immobilier déjà bâti alors qu'il est nécessaire de le faire pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

Les PACT, capables de produire de la chaleur à plus de 80 °C, représentent une avenue prometteuse dans cette direction. Elles sont néanmoins utilisées exclusivement ou presque dans le secteur industriel et majoritairement en Europe et en Asie où la réglementation plus souple sur l'inflammabilité des réfrigérants permet des avancées dans ce domaine. On commence à les voir apparaître dans les réseaux d'énergie urbains, mais très peu de littérature supporte l'adoption des PACT comme outil de décarbonation des bâtiments existants. Le couplage d'une PACT avec un échangeur géothermique pour former une PACGT est une avenue encore moins explorée.

Au Québec, les PCP, un type d'échangeur géothermique performant et particulièrement bien adapté au rétrofit de bâtiments en milieu urbain dense, sont en plein essor. Toutefois, il n'existe à ce jour aucune étude qui se penche sur le couplage d'une PACGT avec des PCP que ce soit au Québec ou ailleurs. Ce projet de recherche tente de combler ce besoin.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie mise en place pour évaluer le potentiel des PACGHT pour décarboner les bâtiments institutionnels. Une étude de cas est réalisée sur un prototype d'école primaire représentatif de l'inventaire québécois. Un modèle de référence correspondant à l'école existante avant rétrofit est développé dans TRNSYS. Sept scénarios de rétrofit pour décarboner cette école sont ensuite modélisés. Six d'entre eux intègrent un échangeur géothermique constitué de PCP. L'intensité carbone des sources énergétiques et les paramètres de l'analyse économique sont ensuite présentés.

3.1 Développement du modèle de référence

3.1.1 Géométrie et zonage

Le bâtiment modélisé est une école primaire québécoise typique basée sur le prototype développé par Vanroy [17]. Tel que mentionné au chapitre 2, 45% des écoles du Québec utilisent le gaz naturel comme source d'énergie principale pour le chauffage [16]. De plus, l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage des espaces est bien souvent associée à la présence d'émetteurs de chaleur à haute température dans les zones du bâtiments. Il y a donc un potentiel intéressant dans les écoles pour le déploiement des PACGHT comme outil de décarbonation ce qui explique l'orientation choisie pour la présente étude.

Basée sur les caractéristiques établies par Vanroy suite à l'analyse des données disponibles sur les bâtiments institutionnels québécois, la superficie de plancher retenue est de 1640 m² répartis sur deux étages et en neuf zones thermiques (voir figure 3.1).

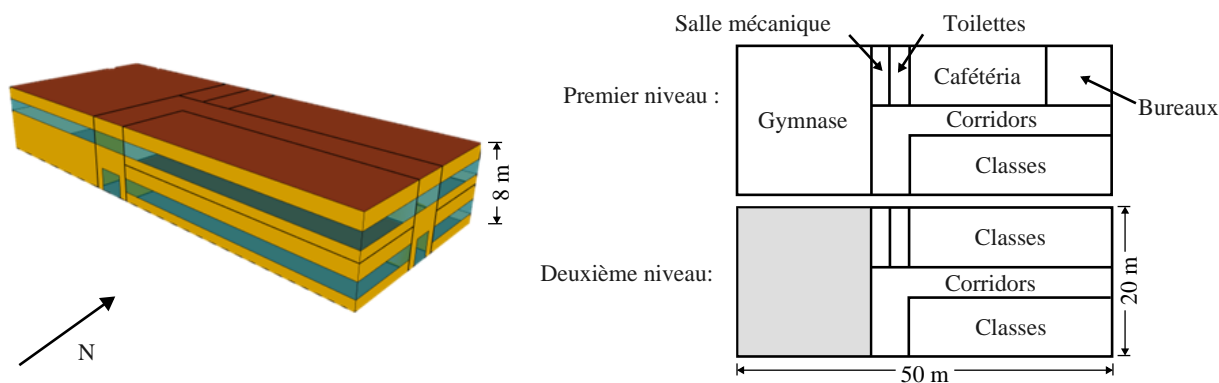


FIGURE 3.1 Géométrie et zonage de l'école primaire

Les zones sont établies en fonction du type d’occupation et de l’orientation solaire. L’école est située à Montréal puisqu’on y retrouve la plus grande densité d’occupation du territoire et, conséquemment, le plus grand nombre d’écoles. Le fichier météo utilisé représente les données climatiques typiques pour l’aéroport international de Montréal (YUL) ; il est extrait de la base de données mise à jour par Environnement Canada en 2020 [45]. Le bâtiment est modélisé dans le logiciel de simulation énergétique TRNSYS 18 [46].

3.1.2 Enveloppe du bâtiment et infiltration

L’enveloppe présente un ratio d’ouverture sur la superficie brute des murs extérieurs, communément appelée le « window-to-wall ratio », de 34%. La conductivité thermique (U) et le coefficient de gain solaire (SHGC) des éléments de l’enveloppe sont présentés au tableau 3.1. Pour les fenêtres et les portes, la valeur U présentée est celle prise au centre du vitrage.

TABLEAU 3.1 Caractéristiques de l’enveloppe de l’école primaire

Élément	U (W/m ² K)	SHGC
Dalle sur sol	3.31	-
Mur extérieur	0.62	-
Toit	0.28	-
Fenêtre	1.59	0.43
Porte	1.59	0.43

L’infiltration est modélisée selon la méthode de Sherman et Grimsrud (type 75b TRNSYS) [47].

$$\dot{Q}_f = 3.6 \cdot ELA \cdot \sqrt{C_s \Delta T + C_w V^2} \quad (3.1)$$

où \dot{Q}_f est le débit d’infiltration en m^3/s . La surface de fuite effective (ELA) est fixée à 6625 cm² d’après une étude réalisée sur des écoles datant de 1950 à 2011 [48]. Cela correspond à un taux d’infiltration sous une différence de pression de 50 Pa (LR50) de 2.8 L/s.m² en considérant les six faces de l’enveloppe extérieure. Les coefficients C_s (effet cheminée) et C_w (effet du vent) sont ceux suggérés pour un bâtiment de classe 3 à deux étages. La vitesse du vent (V) et la température ambiante (T_{amb}) sont lues dans le fichier météo à chaque pas de temps de la simulation.

L’infiltration est réduite à 25% de la valeur nominale lorsque la ventilation mécanique est activée [17].

3.1.3 Gains internes et ventilation

La capacité maximale d'accueil du bâtiment est de 188 occupants, ce qui correspond à la densité d'occupation des classes et des bureaux. L'école est occupée du lundi au vendredi, de 8 AM à 7 PM et de septembre à juin inclusivement. Les gains internes liés aux occupants, à l'éclairage et aux charges aux prises sont présentés au tableau 3.2. Le lecteur est référé au mémoire de Vanroy pour les horaires détaillés appliqués aux gains internes [17].

TABLEAU 3.2 Gains internes et ventilation par type de zone

Type de zone	Densité (m ² /p)	Occupants (W/p)	Éclairage (W/m ²)	Prises (W/m ²)	Rp (L/s.p)	Ra (L/s.m ²)
Classe	3.4	104	14.4	11.0	5	0.6
Gymnase	14	440	8.0	0.0	10	0.9
Cafétéria	1	104	8.0	0.0	1.9	0.3
Bureau	20	132	8.0	11.0	5	0.6
Corridor	0	0	8.0	0.0	0	0.3
Toilette	0	0	8.0	0.0	0	0
Salle mécanique	0	0	8.0	0.0	0	0

Le débit d'air frais (V_{oz}) alimenté à chaque zone est déterminé conformément à la norme ASHRAE 62.1-2022 [49]. Les densités d'occupation pour chaque type de zone ainsi que les taux d'air frais par personne (R_p) et surfacique (R_a) sont présentés au tableau 3.2. L'efficacité de distribution (E_z) est égale à 1. La ventilation est active seulement lorsque l'école est occupée et le débit d'air frais est constant. Au final, un débit total de 2233 L/s est implémenté dans le modèle.

3.1.4 Eau chaude domestique

Les données d'opération du chauffe-eau électrique d'une école primaire québécoise [7] sur une période de cinq mois sont analysées. La production d'eau chaude domestique (ECD) représente une consommation énergétique annuelle normalisée de 0.04 GJ/m². Un chauffe-eau électrique d'une puissance nominale de 8.8 kW est modélisé. Il est en opération lorsque l'école est occupée.

3.1.5 Système CVCA de référence

Le système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVCA) est ensuite modélisé. L'école existante est chauffée par une chaudière au gaz naturel sans condensation présentant une efficacité constante de 0.80. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.2.

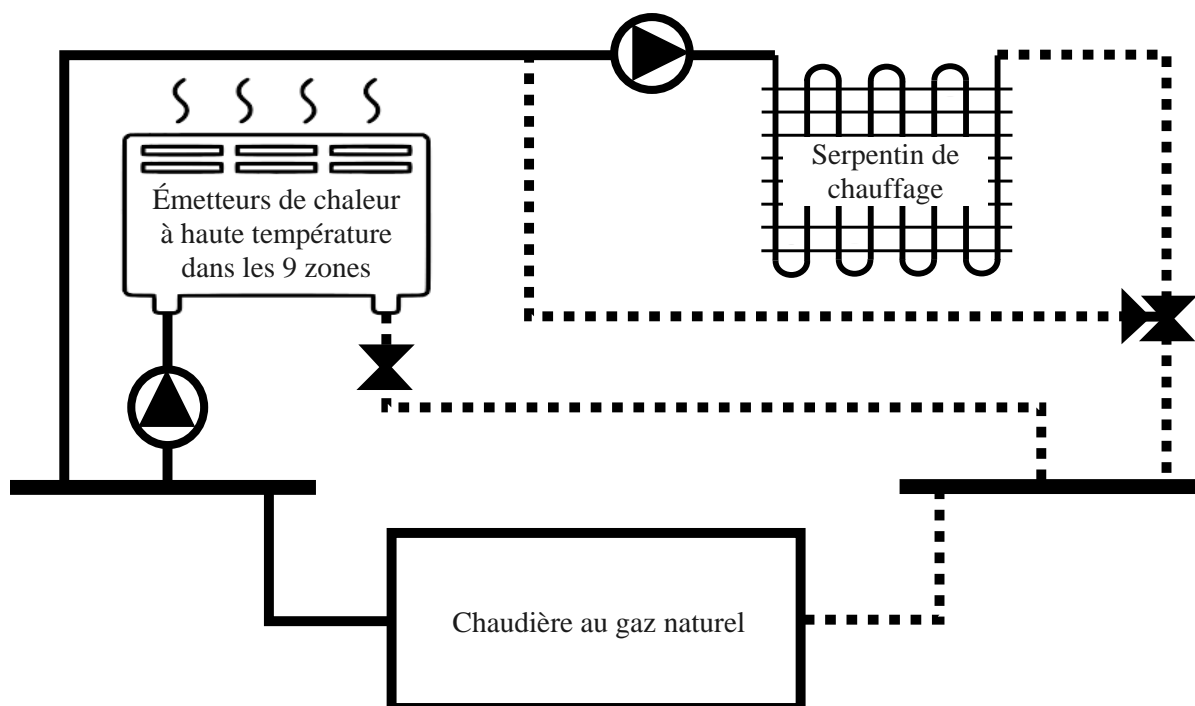


FIGURE 3.2 Schéma CVCA simplifié du scénario chaudière au gaz (école existante)

La température alimentée aux émetteurs de chaleur existants ($T_{alim,rad}$) suit une courbe de chauffage en fonction de la température ambiante (T_{amb}). Cette température d'alimentation est de 82 °C lorsque la température ambiante atteint -15 °C (voir figure 3.3). Les charges de chauffage de l'école sont présentées à la figure 3.4. Celles-ci sont évaluées pour un pas de temps de 15 minutes et un système de chauffage idéalisé dans TRNSYS. La charge de chauffage maximale retenue pour le dimensionnement de la chaudière est de 200 kW (122 W/m²). Il est à noter qu'un pas de temps de 15 minutes correspond au temps d'intégration utilisé pour les compteurs électriques d'Hydro-Québec.

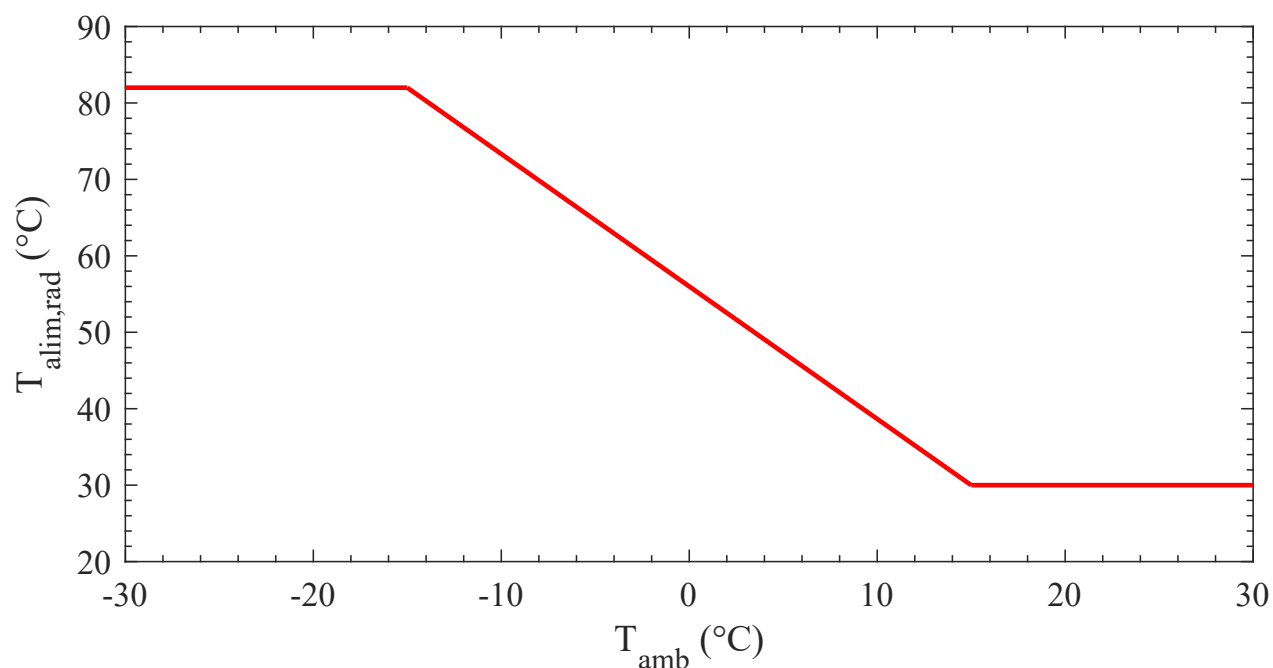


FIGURE 3.3 Courbe de chauffage des émetteurs de chaleur à haute température. Elle s'applique aux scénarios chaudière au gaz, chaudière électrique, PACGHT, PACGHT hybride, PACGHT hybride GNR et PACGHT biénergie.

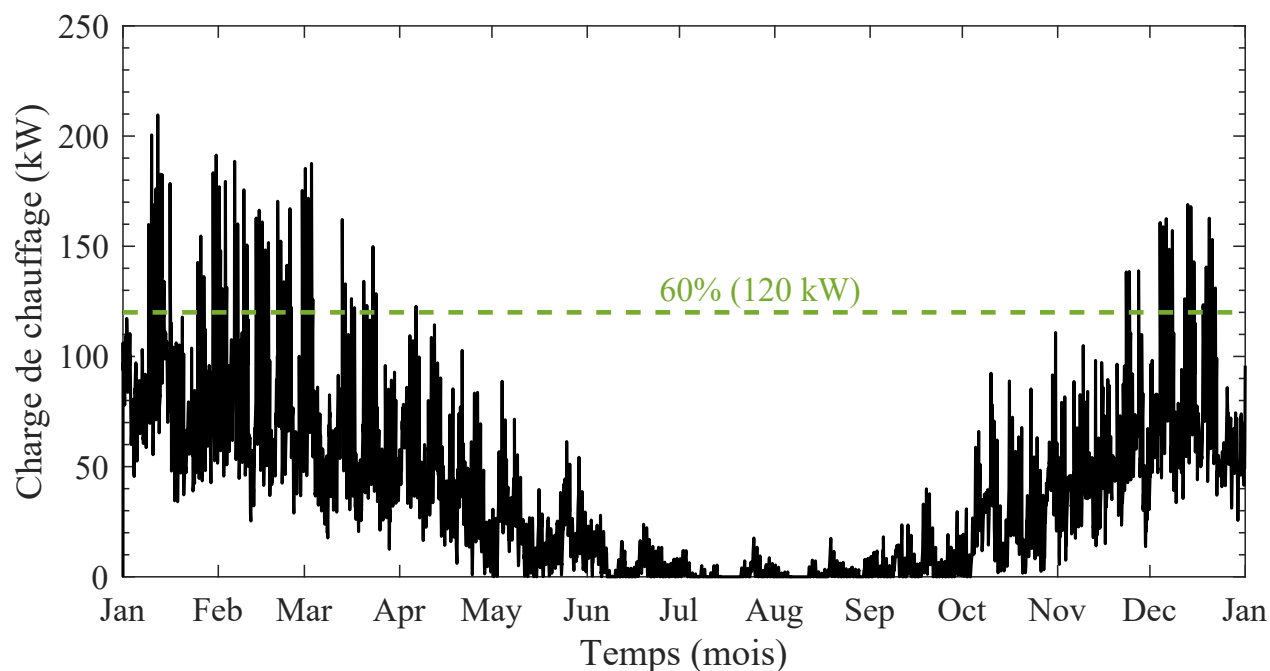


FIGURE 3.4 Charges de chauffage de l'école primaire. La ligne verte pointillée représente la capacité nominale de la PACG ou de la PACGHT des scénarios hybrides.

Les émetteurs de chaleur dans chaque zone sont modélisés dans TRNSYS avec le type 526. La puissance thermique délivrée à la zone (\dot{Q}) en Btu/h pour chaque pas de temps est calculée suivant une relation empirique en régime permanent.

$$T_{\text{he,out}} = T_{\text{air}} + \left[(T_{\text{he,in}} - T_{\text{air}})^{-0.4172} + \left(\frac{0.0000504B}{DC_p f_{\text{he}}^{0.96}} \right) L_{\text{he}} \right]^{-2.397} \quad (3.2)$$

$$\dot{Q} = 8.02086 \cdot f_{\text{he}} \cdot D \cdot C_p \cdot (T_{\text{he,in}} - T_{\text{he,out}}) \quad (3.3)$$

où $T_{\text{he,in}}$ (°F) et $T_{\text{he,out}}$ (°F) sont respectivement les températures du fluide à l'entrée et à la sortie de l'émetteur, T_{air} (°F) est la température sèche de l'air dans la zone, B (Btu/h/pi) est la puissance linéaire de l'émetteur aux conditions nominales, D (lb/pi³) est la densité du fluide, C_p (Btu/lb/°F) est la chaleur spécifique du fluide, f_{he} (USGPM) est le débit volumique du fluide, et L_{he} (pi) est la longueur de l'émetteur. Cette méthode permet à la capacité des émetteurs de varier selon les conditions réelles d'opération. Plus spécifiquement, cela permet d'étudier la capacité des émetteurs à répondre aux besoins thermiques d'une zone en fonction de la température du fluide qui leur est acheminé. Ce niveau de modélisation détaillé n'est typiquement pas requis en pratique. Néanmoins, il est crucial pour cette étude puisqu'une PACG conventionnelle et une PACGHT ne produisent pas un fluide à la même température. De plus, cela permet de calibrer et d'intégrer la courbe de chauffage à la modélisation. Si la courbe de chauffage est trop agressive, les émetteurs ne sont pas en mesure de chauffer adéquatement le bâtiment et cela se traduit par des heures où la température de l'air ambiant s'écarte du point de consigne (PC).

Chaque zone possède un émetteur de chaleur dont la capacité (donc la longueur) est suffisante pour répondre à la charge d'enveloppe maximale déterminée par simulation énergétique. Cette capacité installée est un paramètre important pour la présente étude. En effet, un émetteur surdimensionné peut satisfaire la charge maximale de la zone avec une température de fluide moins chaude que la température nominale de conception (82 °C). Lorsque ce surdimensionnement est important et que l'enveloppe du bâtiment est rénovée, il a été démontré qu'il était possible de remplacer seulement quelques émetteurs critiques pour assurer des températures d'opération compatibles avec des PACG conventionnelles [10]. Pour cette étude, il est supposé que les émetteurs ne sont pas surdimensionnés. Il est donc requis que la chaudière au gaz produise un fluide à 82 °C, soit la température de conception, pour que les charges de pointe en chauffage soient rencontrées. En pratique, les émetteurs de chaleur sont dimensionnés avec un calcul de charge qui ne tient pas compte des gains internes et un facteur de sécurité est ajouté. Ce surdimensionnement n'a pas été considéré afin de ne pas favoriser les scénarios PACGHT. En effet, la courbe de chauffage aurait pu être abaissée et de meilleures

performances obtenues. Le débit de fluide acheminé vers chaque émetteur est modulé par un contrôleur local proportionnel-intégral afin de satisfaire le PC de la zone. Une pompe à débit variable dessert donc cette boucle hydronique.

Un serpentin hydronique localisé dans une unité de traitement d'air centralisée assure le chauffage de l'air frais. L'alimentation vers les zones se fait à température neutre (22 °C). Les charges d'enveloppe sont traitées en entier par les émetteurs de chaleur installés au périmètre du bâtiment. Une pompe à débit constant assure la circulation du fluide au serpentin. Une valve de mélange à trois voies module la température d'entrée du fluide au serpentin afin que l'air frais atteigne son PC de température à la sortie du serpentin. Cette modulation est assurée par un contrôleur PI. Un ventilateur à débit constant assure la distribution de l'air frais vers chaque zone lorsque le bâtiment est occupé.

Le PC des zones est de 22 °C durant la saison de chauffe allant d'octobre à mai inclusivement. Le modèle de référence présente 42 heures annuellement où le PC d'une zone n'est pas satisfait durant l'occupation et en considérant une tolérance de 2 °C. Ce nombre est bien inférieur à la limite de 300 « unmet hours » spécifiée par la norme ASHRAE 90.1-2022 [50]. Le bâtiment de référence est donc bien chauffé.

3.2 Modélisation et couplage des puits à colonne permanente

Le modèle de référence développé à la section 3.1 sert ensuite de base pour modéliser différents scénarios CVCA permettant de réduire les émissions de GES du bâtiment. Tel que discuté au chapitre 2, l'implantation d'une PACG est une mesure efficace de décarbonation. Bien que les PBF soient le type d'échangeur géothermique le plus fréquent au Québec, des PCP sont utilisés dans cette étude pour différentes raisons :

- Les PCP peuvent réduire les coûts de construction de l'échangeur géothermique de 50% par rapport aux PBF selon une étude récente réalisée dans une école primaire québécoise [7].
- Les PCP utilisent directement l'eau souterraine comme fluide caloporteur. L'eau alimentée à l'évaporateur est ainsi plus chaude, ce qui se traduit par un COP et une capacité aux conditions de conception plus élevés que des PBF. Par exemple, descendre la température à la sortie de l'évaporateur de 0 °C (PCP) à -5 °C (PBF) engendre une diminution de la capacité en chauffage de 25% pour la PACGHT à l'étude [51].
- En raison de leur faible empreinte au sol, les PCP sont particulièrement adaptés au rétrofit de bâtiments localisés en milieu urbain dense, où l'espace disponible pour construire un échangeur géothermique peut être un enjeu critique [23].

Contrairement aux PBF, il n'existe pas de module natif dans les logiciels de modélisation énergétique capable de modéliser directement des PCP (voir section 2.2). Il est toutefois nécessaire de coupler la réponse thermique des PCP à la PACG afin d'assurer une simulation précise du système géothermique. Tonellato et al. ont développé une méthodologie permettant de faire ce lien avec TRNSYS (voir figure 3.5) [52]. Ce processus a été repris et adapté pour le présent projet.

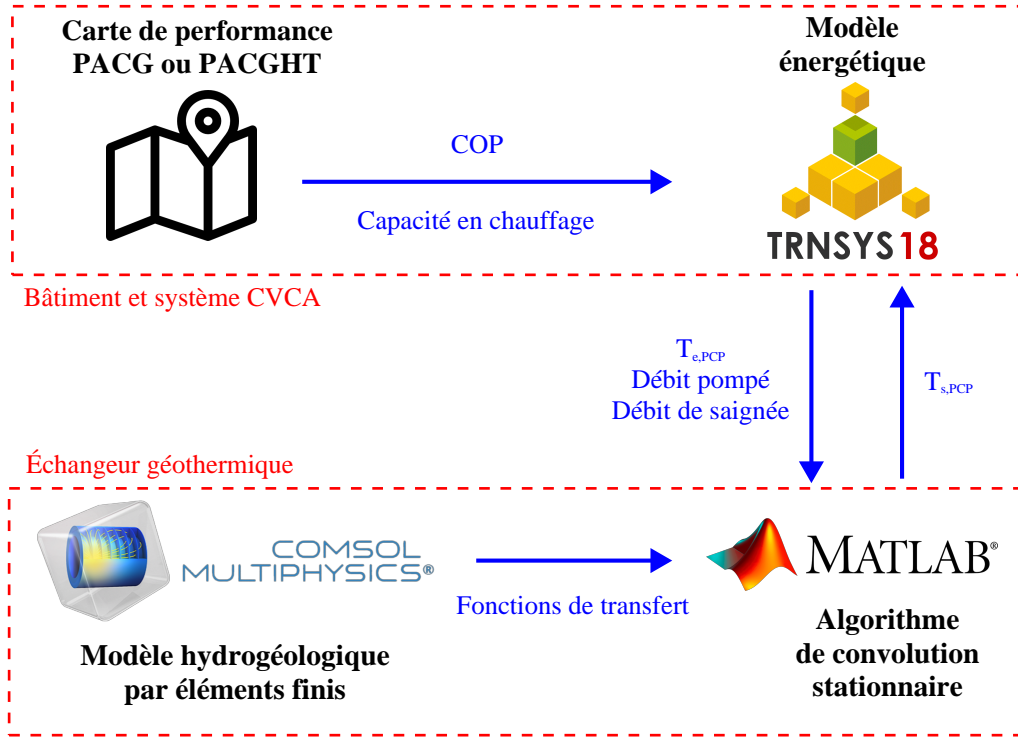


FIGURE 3.5 Stratégie de modélisation employée

Cette méthodologie se divise en deux grandes étapes qui seront détaillées dans les sections suivantes :

- la génération d'une fonction de transfert à l'aide d'un modèle numérique hydrogéologique
- l'implantation d'un algorithme de convolution stationnaire

3.2.1 Fonction de transfert

Une fonction de transfert se définit comme la réponse thermique à la sortie d'un échangeur géothermique soumis à une impulsion de charge unitaire [28, 53]. Le concept est similaire à la très répandue g-fonction, qui est évaluée à la paroi du puits [54].

Les fonctions de transfert utilisées pour la présente étude sont générées avec un modèle hydro-géologique par éléments finis sous COMSOL Multiphysics v. 6.0. Ce modèle 3D symétrique est une adaptation du modèle 2D axisymétrique de Jacques et Pasquier [24]. Le modèle est constitué de trois couches géologiques et de cinq unités hydrostratigraphiques. Les propriétés thermiques et hydrauliques de chacune des couches ont été obtenues par inférence bayésienne d'un essai de réponse thermique réalisé par Robert et al. sur un site de démonstration non loin de Montréal [55]. Le lecteur est référé à l'article de Jacques et Pasquier pour obtenir plus de détails sur le modèle numérique [24].

Les différents scénarios employant un échangeur géothermique ne comportent pas tous le même nombre de PCP ce qui affecte l'interférence entre les puits. Le modèle numérique est ainsi adapté et exploité pour chaque configuration d'échangeur géothermique afin de générer la fonction de transfert correspondante. Les paramètres suivants sont constants d'une fonction de transfert à l'autre :

- Débit de pompage d'un PCP = 190 L/min
- Débit de saignée d'un PCP = 19 L/min (10% du débit pompé)
- Durée = 10 années

3.2.2 Convolution stationnaire

Comme la charge au sol varie dans le temps en fonction des besoins du bâtiment et que la fonction de transfert est générée pour une charge constante, il est requis d'appliquer le principe de superposition temporelle pour évaluer adéquatement la réponse thermique de l'échangeur géothermique. Il serait possible de le faire en lançant une simulation du modèle numérique pour chaque pas de temps du modèle énergétique. Toutefois, cela représente plus de 35 000 simulations par éléments finis (une année aux 15 minutes) ce qui est impensable du point de vue du temps de calcul. Pour pallier à cette lacune, un produit de convolution stationnaire dans le domaine spectral est réalisé [29].

À chaque pas de temps, TRNSYS via le Type 155 passe la température de l'eau à l'entrée des PCP ($T_{e,PCP}$), la charge au sol (Q_g), le débit pompé et le débit de saignée à l'algorithme Matlab [56] de convolution stationnaire. Ce dernier retourne au Type 155 la température de l'eau à la sortie des PCP ($T_{s,PCP}$).

Prendre note que l'algorithme implanté dans le modèle permettrait de faire de la convolution non-stationnaire. Cela serait par exemple utile pour intégrer du pompage à débit variable sur la boucle d'eau souterraine ou encore pour moduler le débit de saignée [30]. Cela n'a toutefois pas été réalisé dans le cadre de cette étude où il est supposé que les PCP opèrent en conditions stationnaires, c'est-à-dire que les débits de pompage et de saignée sont constants durant toute

la saison de chauffage. Il a néanmoins été remarqué que, en conditions non-stationnaires, le temps de calcul devenait plus important. L'algorithme passait alors beaucoup de temps à rechercher la bonne fonction de transfert (selon les débits de pompage et de saignée) à utiliser pour un pas de temps donné.

3.2.3 Dimensionnement de l'échangeur géothermique

Une simulation sur dix ans, tel que prescrit par la norme CSA C448 Series-16 [57], est réalisée pour chaque scénario décarboné intégrant un échangeur géothermique. Cette approche permet de prévoir le bon nombre de PCP pour s'assurer que la température de l'eau souterraine demeure en tout temps au-dessus de la température limite de conception soit 1 °C (une marge de sécurité est conservée par rapport au point de congélation). L'effet d'une dérive de température, engendrée par un débalancement des charges au sol, est ainsi inclus dans le dimensionnement.

Les charges du bâtiment sont les mêmes d'une année à l'autre et un pas de temps de 15 minutes est employé.

Un nombre entier de puits de 135 m est retenu comme ce serait le cas en pratique et ce nombre varie de 4 à 2 selon le scénario modélisé.

En raison de la saignée constante durant toute la saison de chauffage (10% du débit pompé) et des conditions hydrogéologiques favorables du site, aucune dérive de la température de l'eau souterraine n'est constatée sur dix ans et ce, bien que l'échangeur géothermique soit utilisé uniquement en chauffage. Cela démontre un autre avantage important des PCP par rapport aux PBF en présence d'un bilan de charges au sol fortement déséquilibré en climatisation ou en chauffage.

3.3 Scénarios décarbonés

Sept scénarios de décarbonation du bâtiment de référence sont analysés (voir figure 3.6).

Les caractéristiques du modèle présentées à la section 3.1 s'appliquent aux scénarios décarbonés. Seul le système CVCA est modifié pour chacun des scénarios (section 3.1.5).

	EXISTANT	DÉCARBONÉ TAÉ	DÉCARBONÉ HYBRIDE	BIÉNERGIE
CHAUDIÈRE	Chaudière au gaz naturel [3.1]	Chaudière électrique [3.3.1]		
PACG		PACG [3.3.2]	PACG hybride [3.3.3]	
PACGHT		PACGHT [3.3.4]	PACGHT hybride [3.3.5] PACGHT hybride GNR [3.3.6]	PACGHT biénergie [3.3.7]

FIGURE 3.6 Scénarios étudiés. Le numéro de la section qui décrit chaque scénario est indiqué entre crochets.

3.3.1 Chaudière électrique

Ce scénario constitue un projet d'électrification simple. La chaudière au gaz naturel est remplacée par une chaudière électrique de même capacité (200 kW). Cette chaudière présente une efficacité unitaire constante ($COP=1$). La même courbe de chauffage que pour la chaudière au gaz naturel est appliquée pour déterminer la température d'alimentation du fluide. Les émetteurs de chaleur existants sont donc conservés. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.7. Les modifications par rapport au modèle de référence sont représentées en couleur.

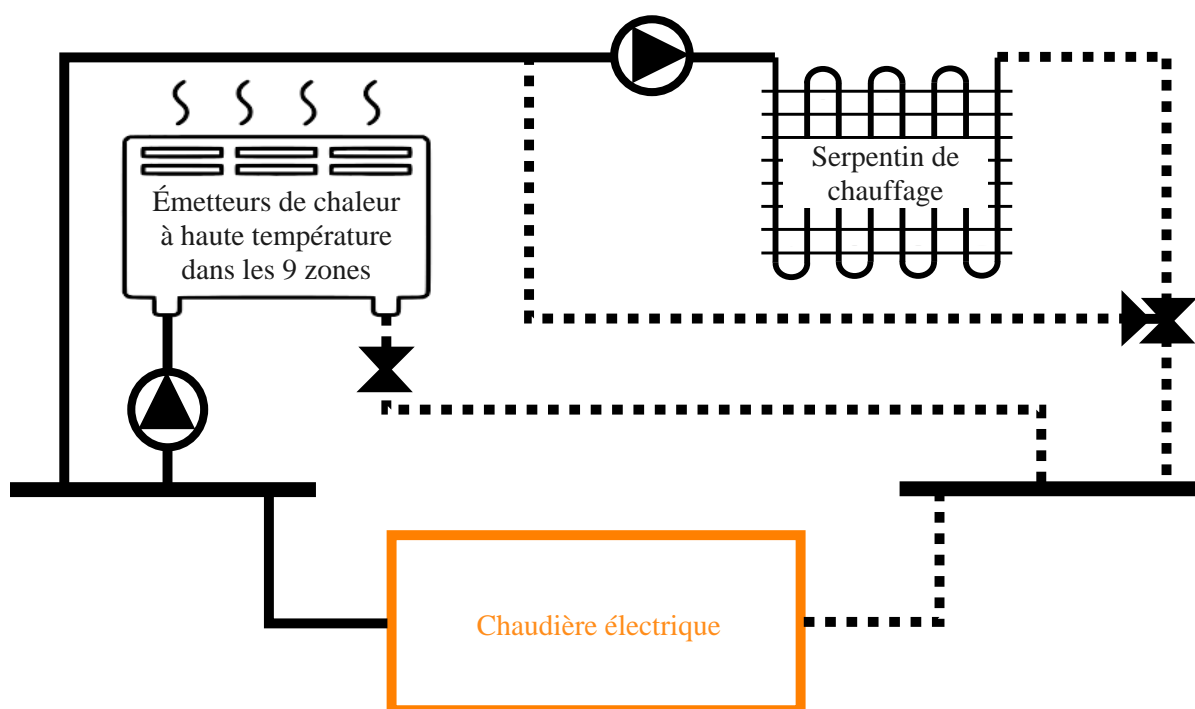


FIGURE 3.7 Schéma CVCA simplifié du scénario chaudière électrique

3.3.2 PACG conventionnelle

Dans ce scénario, la chaudière au gaz naturel est remplacée par une PACG conventionnelle. Cette dernière est couplée à 4 PCP et 1 PI de 135 m chacun. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.8. Les modifications par rapport au modèle de référence sont représentées en couleur.

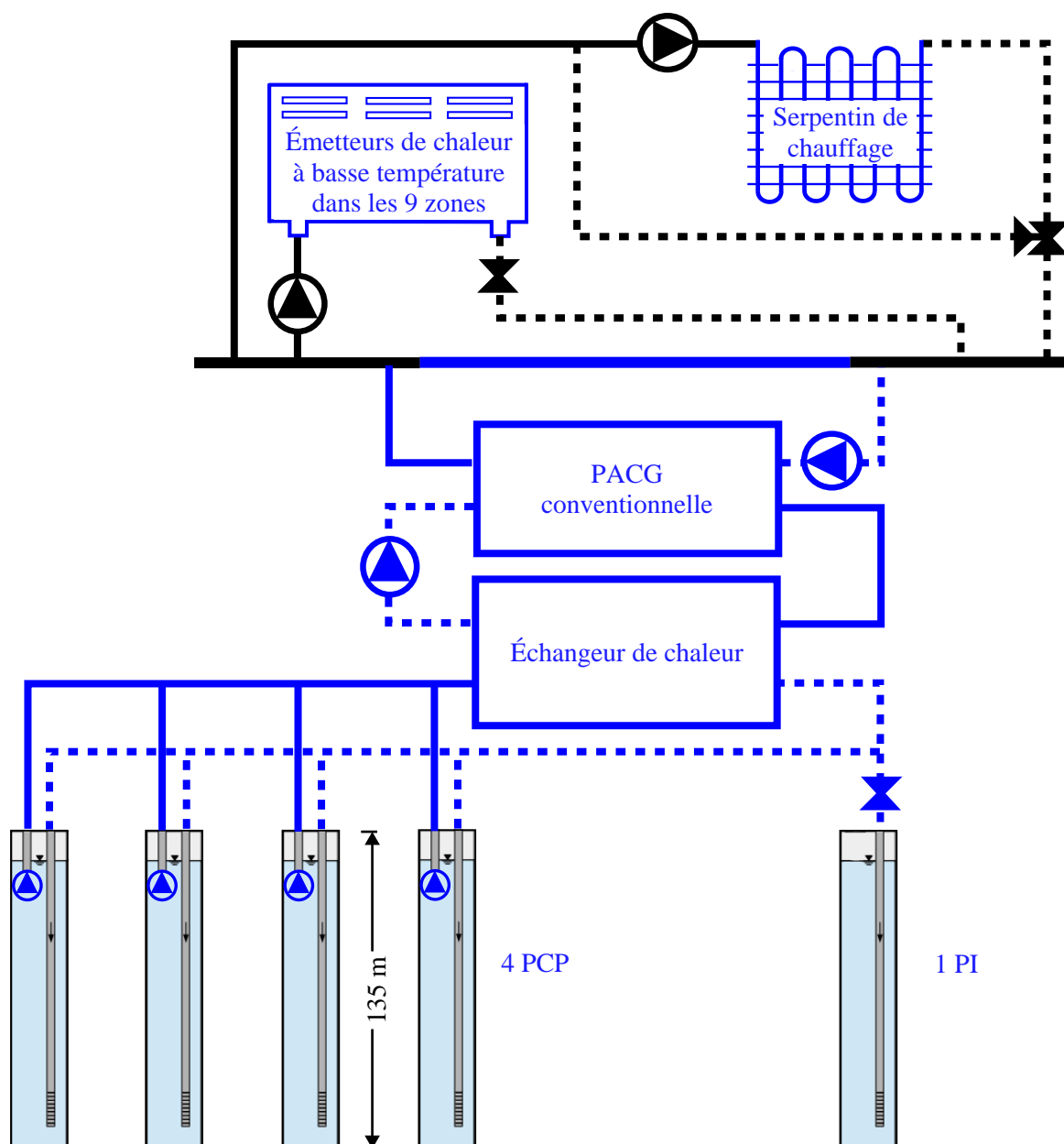


FIGURE 3.8 Schéma CVCA simplifié du scénario PACG

Une carte de performance de la PACG conventionnelle est construite à partir de données obtenues auprès d'un manufacturier. Il s'agit d'un module MSH50 fabriqué par Multistack [58]. L'unité opère selon un cycle thermodynamique simple à un stage de compression. Elle est munie de 4 compresseurs à spirale (« scroll ») à vitesse variable et opérant en parallèle. Le réfrigérant employé est le R454B, classifié A2L selon la norme CSA B52 :23 [40] et présentant un PRG de 466. Le COP et la capacité en chauffage de la PACG varient à chaque pas de temps de la simulation selon les trois paramètres du Type TRNSYS utilisé [59] :

- la température d'entrée à l'évaporateur ;
- la température d'entrée au condenseur ;
- le ratio de charge partielle.

Il a été remarqué que le PLR avait un effet négligeable sur les performances de la PACG. La carte de performance peut donc être représentée en deux dimensions (voir figure 3.9).

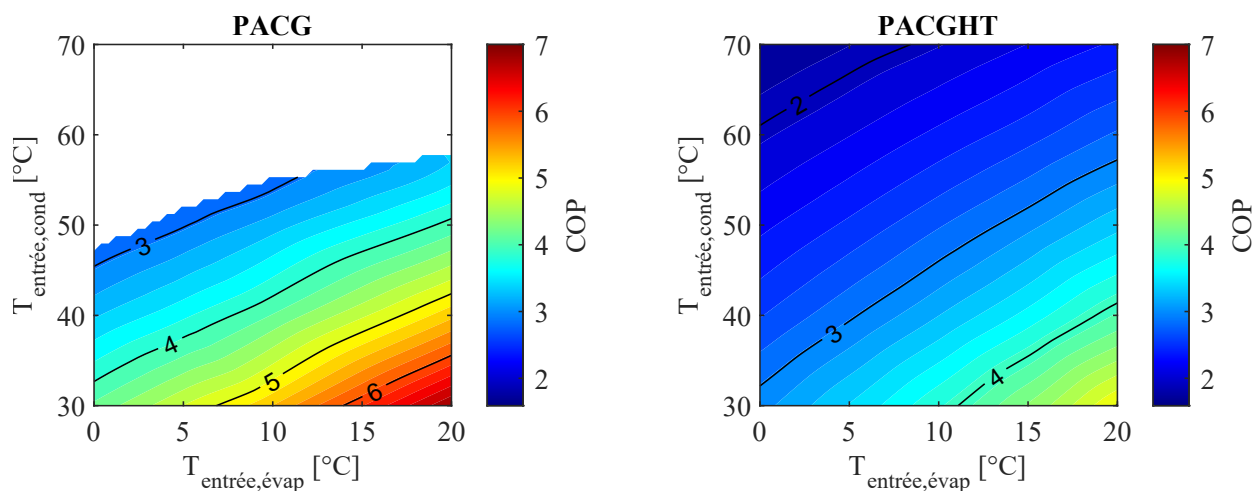


FIGURE 3.9 Cartes de performance de la PACG et de la PACGHT

Les conditions de conception de la PACG sont présentées au tableau 3.3.

TABLEAU 3.3 Conditions de conception de la PACG

Description	Unité	Valeur
Capacité au condenseur	kW	200
Température entrée évaporateur	°C	5
Température entrée condenseur	°C	45
Débit fluide évaporateur	L/s	9.1
Débit fluide condenseur	L/s	10.4
COP	-	3.4

Les émetteurs de chaleur à haute température existants sont remplacés par des émetteurs de chaleur à basse température. Les mêmes charges d'enveloppe que pour le modèle de référence sont utilisées, mais la température d'alimentation du fluide en chauffage de pointe est maintenant de 50 °C plutôt que 82 °C. Il en est de même pour le serpentin de chauffage qui neutralise l'air frais. Une nouvelle courbe de chauffage s'applique ainsi aux scénarios avec une PACG (voir figure 3.10).

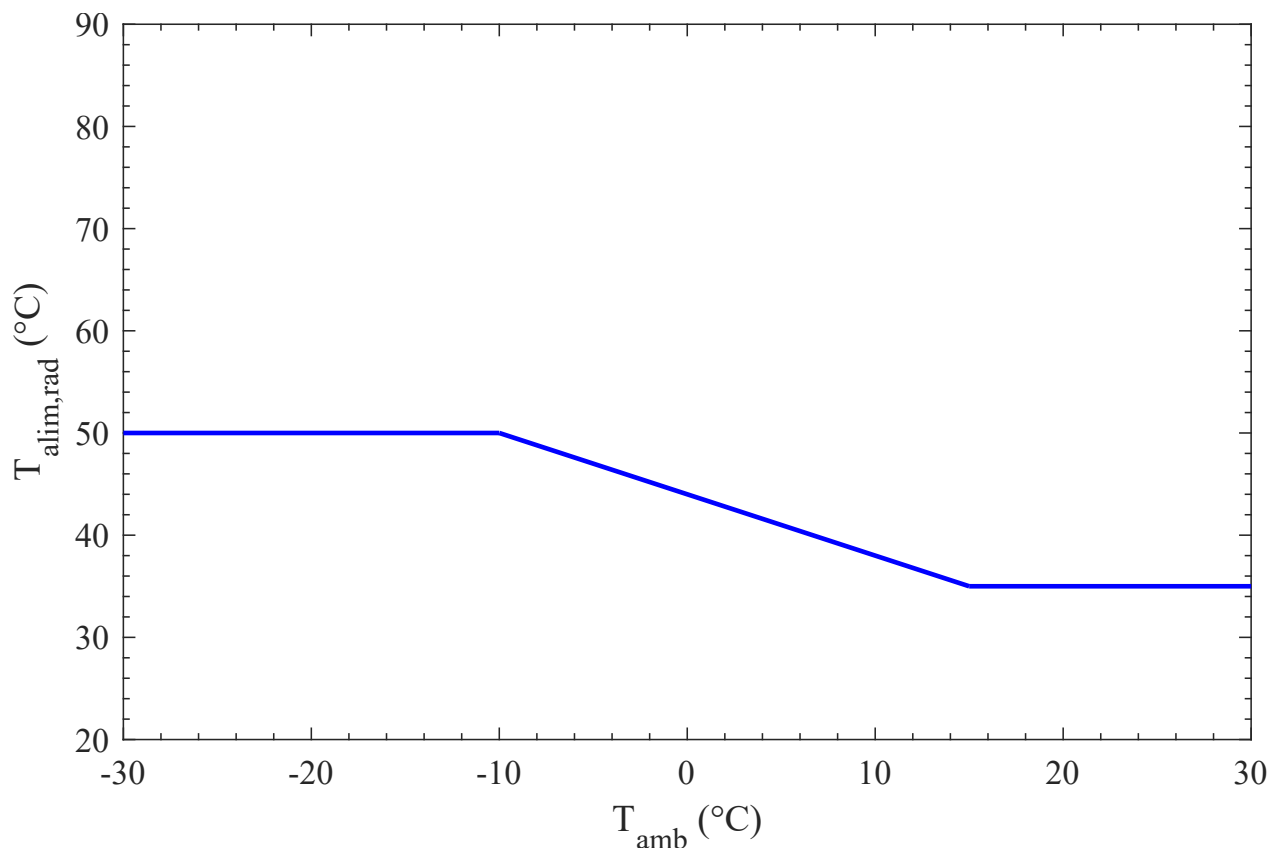


FIGURE 3.10 Courbe de chauffage des émetteurs de chaleur à basse température. Elle s'applique aux scénarios PACG et PACG hybride.

Par rapport au modèle de référence, des pompes sont ajoutées pour assurer le fonctionnement du système géothermique. Une pompe à débit constant est ajoutée du côté source et du côté charge de la PACG (voir tableau 3.3). Une pompe submersible présentant un débit constant de 3.2 L/s est installée dans chaque PCP.

Un échangeur de chaleur empêche l'eau souterraine de circuler directement dans l'évaporateur de la PACG. Cela est une bonne pratique de conception pour protéger la PACG de l'encrassement (et d'un éventuel colmatage).

3.3.3 PACG conventionnelle hybride

Ce scénario est similaire au précédent à la différence que la capacité de la PACG conventionnelle est réduite à 120 kW soit 60% de la charge maximale de chauffage. Ce choix de couverture est courant en pratique et permet de couvrir, dans ce cas précis, 95% des besoins annuels de chauffage. Un PCP est retiré étant donné qu'il n'est plus nécessaire pour respecter la température limite de dimensionnement. Ainsi, la chaudière au gaz naturel agit comme chauffage d'appoint ce qui forme un système géothermique hybride. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.11. Les modifications par rapport au modèle de référence sont représentées en couleur.

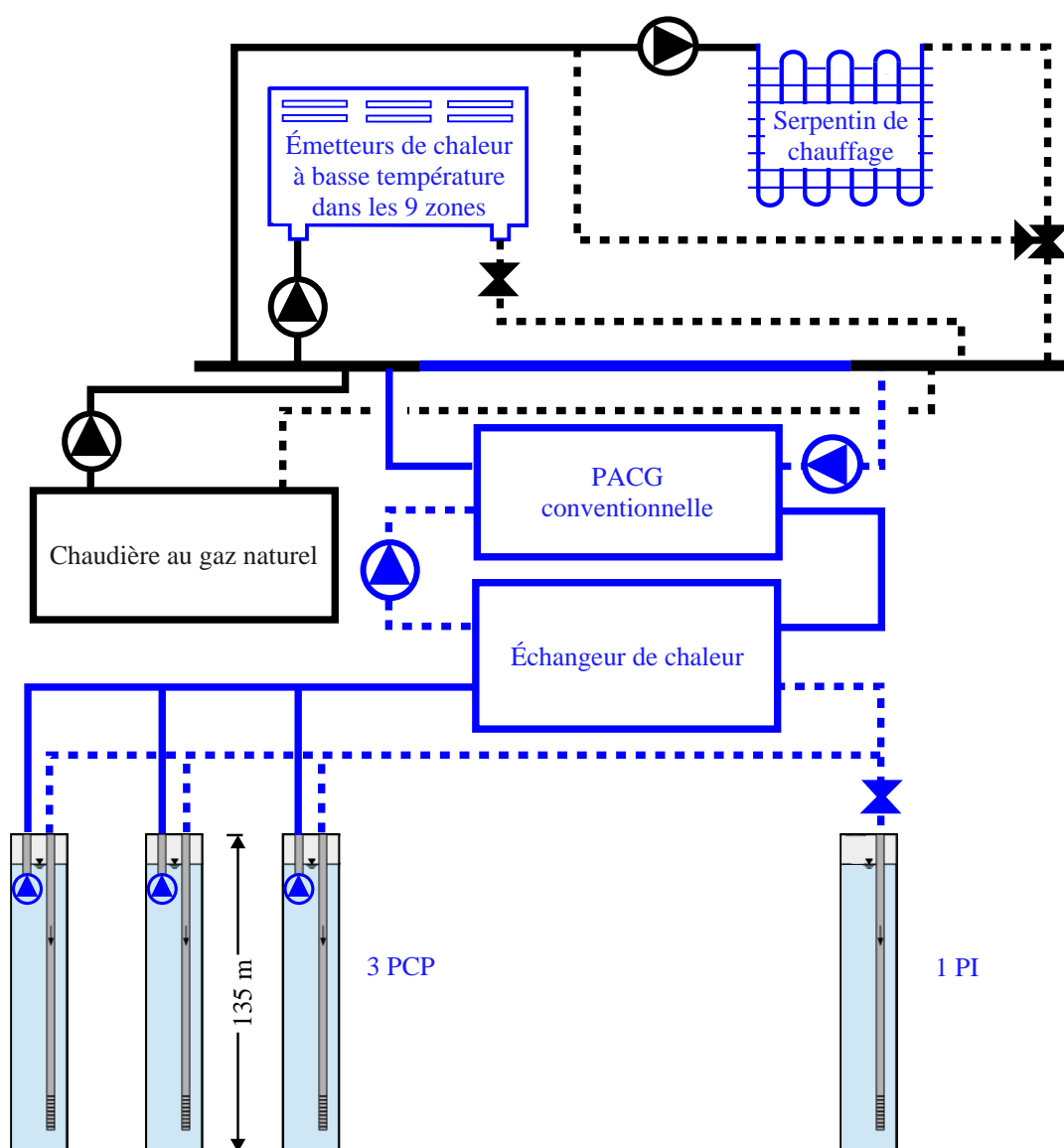


FIGURE 3.11 Schéma CVCA simplifié du scénario PACG hybride

Lorsque les besoins de chauffage du bâtiment excèdent la capacité en chauffage de la PACG, cela se traduit par une température à la sortie du condenseur sous le PC demandé par la courbe de chauffage. La chaudière au gaz naturel démarre alors pour satisfaire ce PC.

3.3.4 PACGHT

Dans ce scénario, la chaudière au gaz naturel est remplacée par une PACGHT. Cette dernière est couplée à 3 PCP et 1 PI de 135 m chacun. Un PCP est donc retranché par rapport au scénario PACG (4 PCP). Cela est attribuable au fait que la PACGHT présente un COP plus faible que la PACG ce qui limite les charges au sol et donc le nombre de PCP. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.12. Les modifications par rapport au modèle de référence sont représentées en couleur.

Une carte de performance de la PACGHT est construite à partir de données obtenues auprès d'un fabricant. Il s'agit du modèle P220 fabriqué par Oilon [51]. L'unité opère selon un cycle thermodynamique à un stage de compression intégrant un sur-refroidisseur au condenseur. Elle est munie de 3 compresseurs à pistons à vitesse variable et opérant en parallèle. Le réfrigérant employé est le R450A classifié A1 selon la norme CSA B52 :23 [40] et présentant un PRG de 604. Cette carte de performance est construite de la même manière que pour la PACG (voir figure 3.9).

Les conditions de conception de la PACGHT sont présentées au tableau 3.4.

TABLEAU 3.4 Conditions de conception de la PACGHT

Description	Unité	Valeur
Capacité au condenseur	kW	200
Température entrée évaporateur	°C	5
Température entrée condenseur	°C	70
Débit fluide évaporateur	L/s	8.3
Débit fluide condenseur	L/s	6.8
COP	-	1.9

Les émetteurs de chaleur à haute température existants sont conservés étant donné que la PACGHT peut alimenter de l'eau à 82 °C. Le même principe s'applique pour le serpentin de chauffage qui alimente l'air frais à 22 °C. La même courbe de chauffage que pour la chaudière au gaz s'applique (voir figure 3.3).

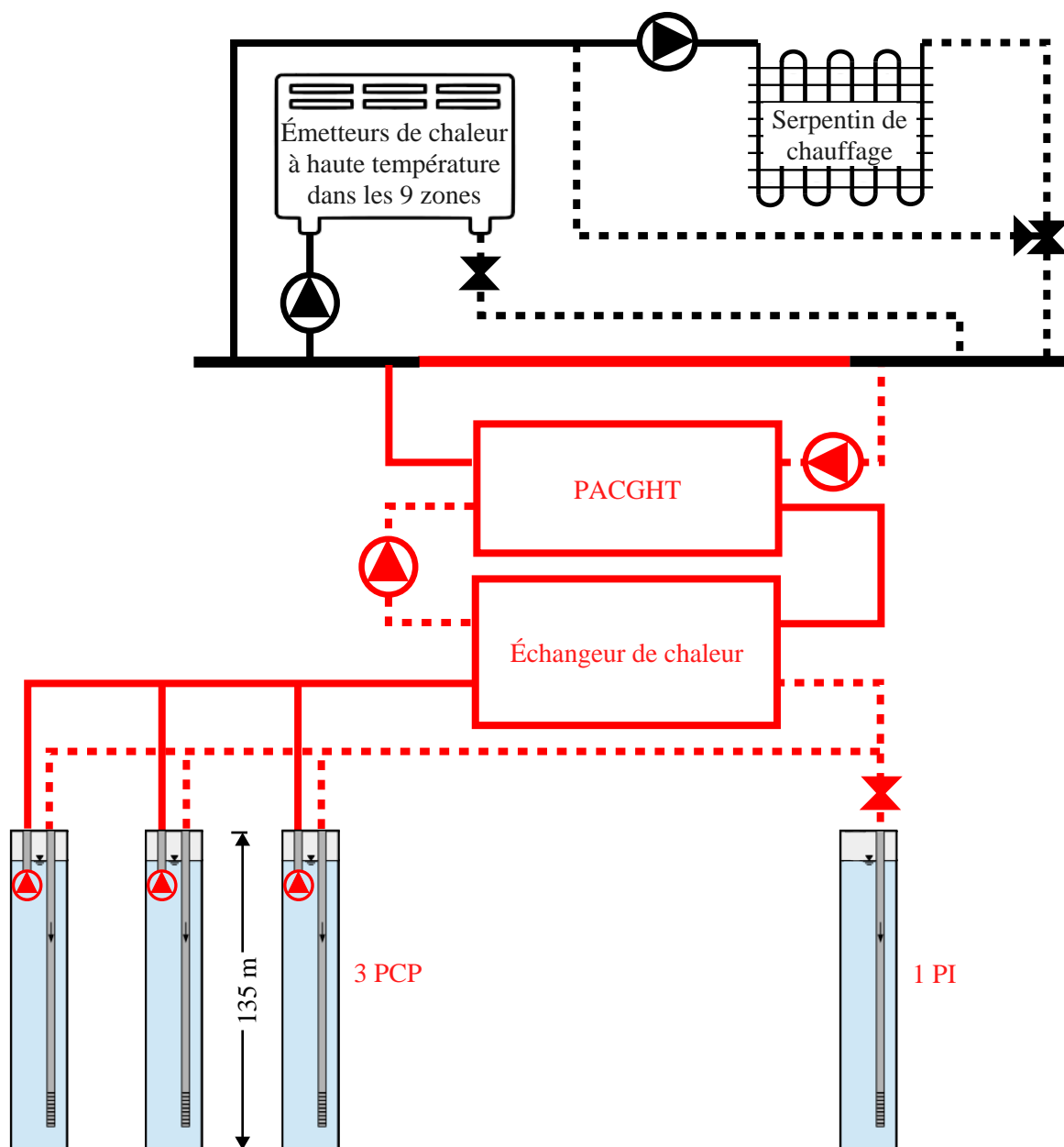


FIGURE 3.12 Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT

Par rapport au modèle de référence, des pompes sont ajoutées pour assurer le fonctionnement du système géothermique. Une pompe à débit constant est ajoutée du côté source et du côté charge de la PACGHT (voir tableau 3.4). Une pompe submersible présentant un débit constant de 3.2 L/s est installée dans chaque PCP au nombre de trois dans ce scénario (comparativement à 4 pour le scénario PACG). Un échangeur de chaleur empêche l'eau souterraine de circuler directement dans l'évaporateur de la PACGHT. Cela est une bonne pratique de conception pour protéger la PACGHT de l'encrassement (et d'un éventuel colmatage).

3.3.5 PACGHT hybride

Ce scénario est similaire au précédent à la différence que la capacité de la PACGHT est réduite à 120 kW soit 60% de la charge maximale de chauffage. Un PCP est retiré étant donné qu'il n'est plus nécessaire pour respecter la température limite de dimensionnement. Ainsi, la chaudière au gaz naturel agit comme chauffage d'appoint ce qui forme un système géothermique hybride. L'arrangement du système CVCA est présenté à la figure 3.13. Les modifications par rapport au modèle de référence sont représentées en couleur.

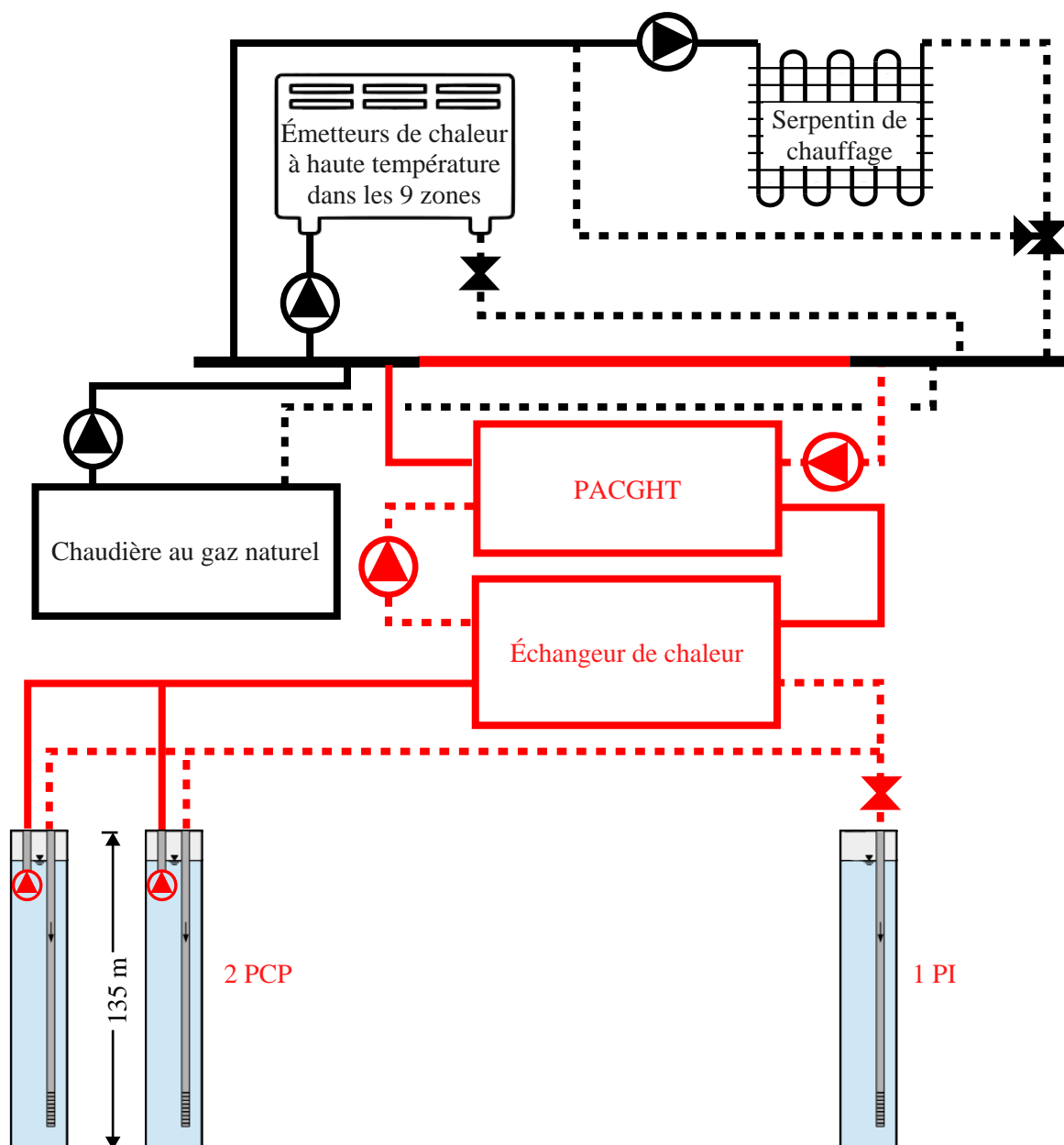


FIGURE 3.13 Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT hybride

Lorsque les besoins de chauffage du bâtiment excède la capacité en chauffage de la PACGHT, cela se traduit par une température à la sortie du condenseur sous le PC demandé par la courbe de chauffage. La chaudière au gaz naturel démarre alors pour satisfaire ce PC.

3.3.6 PACGHT hybride avec gaz naturel renouvelable

Ce scénario est similaire au précédent (voir figure 3.13). La différence réside dans l'utilisation de gaz naturel renouvelable (GNR) plutôt que fossile. L'intensité carbone (voir section 3.4) et la tarification (voir section 3.5.4) sont donc différentes du gaz naturel fossile.

3.3.7 PACGHT biénergie

Ce scénario est similaire au scénario PACGHT hybride (voir figure 3.13). Les différences sont les suivantes :

- Suivant les exigences de l'offre biénergie d'Hydro-Québec, la PACGHT cesse d'opérer lorsque la température ambiante descend sous $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- La chaudière au gaz naturel est donc la seule source de chauffage lorsque la température ambiante descend sous $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- un deuxième compteur électrique dédié au chauffage des espaces est ajouté.
- La tarification biénergie s'applique pour l'électricité (voir section 3.5.3).

3.4 Intensité carbone des sources énergétiques

Afin d'évaluer la performance environnementale des différents scénarios, une intensité carbone (IC) constante est attribuée à chaque source énergétique :

- Électricité = $9.6\text{ }gCO_2e/MJ$ ($34.5\text{ }gCO_2e/kWh$). Il s'agit du taux d'émission « cycle de vie » publié sur le site web d'Hydro-Québec d'après une étude scientifique [2]. Cette valeur est plus élevée que la valeur retenue ($0.4\text{ }gCO_2e/MJ$) par le MERN pour réaliser l'inventaire des GES des bâtiments du secteur institutionnel qui ne considère que les émissions directes [60].
- Gaz naturel fossile = $67.8\text{ }gCO_2e/MJ$. Il s'agit de la valeur recommandée par le règlement sur les combustibles propres (RCP) du Canada [61]. Cette valeur est plus élevée que la valeur retenue ($51.1\text{ }gCO_2e/MJ$) par le MERN pour réaliser l'inventaire des GES des bâtiments du secteur institutionnel [60]. Elle a toutefois été retenue puisqu'elle sert directement à la comparaison avec le GNR dans le RCP.
- Gaz naturel renouvelable = $14\text{ }gCO_2e/MJ$. Il s'agit de la valeur employée par Énergir dans sa demande à la Régie de l'énergie concernant la mise en place de mesures

relatives à l'achat et la vente de GNR [62]. Cette valeur est plus élevée que la valeur retenue ($0.3 \text{ gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$) par le MERN pour réaliser l'inventaire des GES des bâtiments du secteur institutionnel [60]. Prendre note qu'on retrouve également l'appellation gaz de source renouvelable (GSR) dans la littérature.

3.5 Analyse économique

Afin d'évaluer la performance économique des différents scénarios, une analyse économique est effectuée. L'investissement initial (CAPEX) pour réaliser chaque projet de rétrofit est d'abord calculé. Au Québec, différentes subventions sont disponibles pour supporter les propriétaires qui décarbonent leurs bâtiments. Celles-ci sont évaluées et intégrées à l'analyse. Ensuite, les coûts d'opération (OPEX) sont évalués pour chaque scénario. Ceux-ci comprennent les factures d'électricité et de gaz naturel, mais excluent les dépenses d'entretien des systèmes. Finalement, à partir des CAPEX et des OPEX, il est possible de calculer la valeur actualisée nette (VAN) et la période de retour sur investissement (PRI) pour chaque scénario. Les prochaines sections présentent de manière détaillée chacune de ces étapes.

3.5.1 Investissement initial

L'investissement initial est évalué pour chaque scénario. Cela correspond à une estimation du montant du contrat qui serait octroyé à un entrepreneur général pour réaliser la portée de travaux décrite à la section 3.3. Cela inclut la fourniture et l'installation de toutes les composantes électromécaniques par les entrepreneurs spécialisés suivants :

- Géothermie : forage et aménagement des PCP et du PI, fourniture et installation de la tuyauterie horizontale enfouie, aménagement des tranchées, isolation de la tuyauterie horizontale ainsi que l'installation des pompes submersibles.
- PAC & tuyauterie : fourniture et installation de l'équipement de production de chaleur (chaudière électrique, PACG et PACGHT), des nouveaux émetteurs de chaleur à basse température, de la tuyauterie, du calorifugeage, des pompes et des échangeurs de chaleur.
- Électricité : branchement des nouveaux équipements mécaniques, fourniture et installation d'un transformateur pour raccorder la PACGHT, remplacement de l'entrée électrique et ajout du compteur biénergie.
- Contrôle : fourniture et installation de composantes de commande numérique directe (direct digital control, DDC) pour assurer la régulation automatique des nouveaux équipements mécaniques.
- Ventilation : fourniture et installation d'un système de climatisation refroidi à l'air

(pour le scénario de référence seulement) ainsi que remplacement du serpentin de chauffage.

Les coûts qui pourraient être engendrés pour d'autres disciplines telles qu'en architecture, en structure ou en civil sont exclus de l'analyse. Les coûts ont essentiellement été obtenus à partir des certificats de paiement d'un projet de rétrofit d'école primaire réalisé à proximité de Montréal de 2021 à 2022 [7]. Il s'agit donc des montants réels qui ont été versés à l'entrepreneur général pour réaliser des travaux comparables.

Les coûts de fourniture de la PACG et de la PACGHT sont établis sur la base de soumissions obtenues en 2024 auprès des distributeurs de chaque équipement. Ces coûts sont normalisés par la capacité en chauffage (puissance au condenseur) aux conditions de conception :

- PACG = 1257\$/kW
- PACGHT = 1585\$/kW

Les taxes provinciale et fédérale totalisant 14.975% sont ensuite ajoutées à l'investissement initial pour le calcul de la VAN et de la PRI. Aucunes contingences d'estimation supplémentaires ne sont considérées.

3.5.2 Subventions

Au Québec, des appuis financiers sont disponibles pour encourager les centres de services scolaires à décarboner leur parc immobilier et ainsi renforcer l'exemplarité de l'état en matière de décarbonation. Les subventions suivantes sont intégrées dans l'analyse :

- Programme Solutions efficaces d'Hydro-Québec (HQ). Cet appui financier est évalué en utilisant l'Outil de calcul Solutions Efficaces (OSE) 5.0 disponible gratuitement sur le site d'HQ [63]. Les montants sont alloués proportionnellement à la capacité en chauffage aux conditions de conception de la PACG ou de la PACGHT utilisée pour le chauffage des espaces. Conformément aux exigences de ce programme, notons que ces montants varient selon que la PAC alimente un réseau haute température ($> 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou basse température ($< 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) et selon que le bâtiment fonctionne en tout-à-l'électricité (TAÉ) ou qu'il soit multisource comme c'est le cas les scénarios hybrides. Notons également que des montants sont disponibles pour des PAC produisant de l'ECD bien que cela ne fasse pas partie de la portée de cette étude. Le 31 mars 2025, l'outil OSE a migré vers la version 5.1. Cette mise à jour n'affecte néanmoins pas les montants considérés.
- Mesure 50646 du Ministère de l'Éducation du Québec (MEQ). Cet appui financier est déterminé conformément aux règles budgétaires pour les investissements pour les années scolaires 2024-2025 à 2026-2027 publiées par le MEQ [64]. La mesure 50646

est une allocation particulière versée à un centre de services scolaires pour subventionner des travaux qui permettent de réduire ou d'éviter des émissions de GES dans les écoles. Le montant versé permet d'abaisser la PRI à 5 ans ou jusqu'à un maximum de 2600\$/ tCO_2e évitée annuellement par rapport au bâtiment existant. Lorsqu'un scénario présente une PRI négative (augmentation de la facture énergétique par rapport à l'existant), le montant est calculé sans limite sur la PRI. Un exemple de calculs est disponible dans la documentation rendue disponible en ligne par le MEQ [64].

- Programme Écoperformance volet implantation standard de Transition Énergétique Québec (TEQ). Cet appui financier a été étudié. Cependant, aucun des scénarios à l'étude n'a pu en bénéficier puisque les travaux éligibles doivent présenter une PRI maximale avant appuis financiers de 20 ans par rapport au bâtiment existant. À titre indicatif, le programme prévoit un montant pouvant atteindre 1250\$/ tCO_2e évitée annuellement avec un engagement de 10 ans et sous certaines conditions [65].
- Programme Écoperformance volet Biénergie CI de TEQ. Cet appui financier a été étudié pour le scénario PACGHT biénergie spécifiquement. Cependant, il n'est pas possible de jumeler cette subvention avec celles versées par d'autres organisations qu'Énergir et HQ. Ainsi, comme la mesure 50646 du MEQ est légèrement plus généreuse (156 000\$ vs 150 000\$), le volet Biénergie CI a été exclue. À titre indicatif, le programme prévoit un montant pouvant atteindre 2500\$/ tCO_2e évitée annuellement avec un engagement de 10 ans et sous certaines conditions [66].

Ces appuis financiers sont cumulés (lorsque possible) et déduits de l'investissement initial après taxes pour le calcul de la VAN et de la PRI.

3.5.3 Tarification de l'électricité

Le tarif M d'Hydro-Québec en vigueur au 1er avril 2024 est appliqué pour tous les scénarios sauf le PACGHT biénergie [67]. Ce tarif se décline en deux volets soit le prix de l'énergie et le prix de la puissance appelée. Chaque mois est considéré comme une période de facturation.

Prix de l'énergie :

- 5.851 ¢/kWh pour la première tranche de 210 000 kWh pour chaque période de facturation
- 4.339 ¢/kWh pour le reste de l'énergie consommée pour chaque période de facturation

Prix de la puissance :

- 16.962 \$/kW pour chaque période de facturation
- La puissance à facturer correspond à la puissance maximale appelée pour la période de facturation, ou à la puissance minimale à facturer, si cette dernière est plus élevée.

- La puissance appelée correspond à la puissance moyenne évaluée sur 15 minutes.
- La puissance maximale appelée correspond à la plus grande puissance appelée au cours d'une période de facturation.
- La puissance minimale à facturer correspond à 65% de la puissance maximale appelée au cours d'une période de consommation qui se situe en totalité dans la période d'hiver comprise dans les 12 périodes mensuelles consécutives prenant fin au terme de la période de consommation visée. La période d'hiver couvre les mois de décembre à mars inclus.

Prendre note que le pas de temps de la simulation est de 15 minutes ce qui permet d'évaluer précisément la puissance appelée telle qu'elle est facturée par Hydro-Québec. La plupart des modèles énergétiques ont un pas de temps horaire ce qui ne permet pas de bien capter cette composante.

Le scénario PACGHT biénergie utilise le tarif biénergie de moyenne puissance d'Hydro-Québec. Ce tarif s'applique uniquement à l'électricité liée au chauffage des espaces. C'est donc dire que la PACGHT a son propre compteur d'électricité et son propre tarif. Tout le reste de l'électricité est facturé au tarif M. Ce tarif vise à dissuader l'utilisation du chauffage électrique lorsque la température ambiante descend sous la température de permutation (-12 °C pour un bâtiment situé à Montréal).

Le tarif biénergie se décline en deux volets selon le moment de l'année.

En période de chauffage (octobre à avril inclusivement) :

- 6.504 ¢/kWh lorsque la température ambiante est supérieure ou égale à -12 °C
- 58.168 ¢/kWh lorsque la température ambiante est inférieure à -12 °C

Hors de la période de chauffage (mai à septembre inclusivement) :

- Le tarif M présenté précédemment s'applique sans la contrainte de la puissance minimale à facturer (65%).

3.5.4 Tarification du gaz naturel

Le tarif D1 d'Énergir au 1er décembre 2024 est appliqué [68]. Ce tarif se divise en plusieurs composantes :

- Fourniture de la molécule, diffère selon qu'il s'agisse de gaz d'origine fossile ou renouvelable (GNR)
- Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE), il s'agit d'une taxe carbone fixée par le gouvernement du Québec, ne s'applique pas pour le GNR
- Socialisation, s'applique pour le GN fossile seulement pour répartir la facture du GNR invendu, mais injecté dans le réseau par obligation légale

- Inventaire
- Transport
- Équilibrage
- Frais fixes de distribution
- Frais variables de distribution

Il faut donc connaître les extrants de la simulation énergétique pour bien évaluer les frais d'inventaire et les frais de distribution.

Le tableau 3.5 présente les coûts détaillés du gaz naturel pour chaque scénario qui en consomme.

TABLEAU 3.5 Coûts détaillés du gaz naturel fossile et renouvelable

Description	Unité	Chaudière au gaz	PACG hybride	PACGHT hybride	PACGHT hybride GNR	PACGHT biénergie
Volume annuel consommé	m ³	34867	1511	1162	1162	9646
Fourniture	€/m ³	9.814	9.814	9.814	85.818	9.814
SPEDE	€/m ³	8.199	8.199	8.199	-	8.199
Socialisation	€/m ³	0.133	0.133	0.133	-	0.133
Inventaire	€/m ³	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Transport	€/m ³	2.833	2.833	2.833	2.833	2.833
Équilibrage	€/m ³	5.122	5.122	5.122	5.122	5.122
Distribution (fixe)	€/m ³	1.729	16.410	21.349	21.349	2.571
Distribution (variable)	€/m ³	24.267	34.015	34.015	34.015	26.235
Total	€/m³	52.098	76.526	81.466	149.138	54.908

Prendre note que le prix de fourniture de la molécule de gaz naturel d'origine fossile utilisé pour cette étude (9.814 €/m³) correspond au prix chargé par Énergir en décembre 2024 qui était alors bas. La moyenne entre janvier 2020 et mars 2025 est de 15.294 €/m³. Au moment d'écrire ces lignes en mars 2025, il est à la hausse et il atteint 19.476 €/m³. Cela aurait pour effet d'augmenter les coûts d'opération des scénarios employant le gaz naturel comme source de chauffage. Le scénario de référence serait particulièrement touché étant donné qu'il utilise un volume beaucoup plus important de gaz naturel que les autres scénarios. De plus, le prix de fourniture du GNR est fixé annuellement par Énergir. Ainsi, au moment d'écrire ces lignes, le prix d'octobre 2024 utilisé pour cette étude est toujours en vigueur.

3.5.5 Valeur actualisée nette

La VAN sur 25 ans permet de quantifier la performance économique à moyen terme. Elle est calculée pour chacun des scénarios géothermiques en prenant le scénario chaudière électrique comme référence. En effet, il est supposé que le statut quo où la chaudière au gaz naturel continue d'être opérée sans effort de décarbonation n'est pas une option pour atteindre les cibles de réduction de GES dont le gouvernement s'est lui-même doté. L'état a un rôle d'exemplarité à jouer.

L'investissement supplémentaire (C) pour implanter la solution proposée par rapport au scénario de référence est d'abord calculé :

$$C = CAPEX_p - CAPEX_r \quad (3.4)$$

où : $CAPEX_p$ est l'investissement initial incluant taxes et subventions du scénario proposé, $CAPEX_r$ est l'investissement initial incluant taxes et subventions du scénario de référence.

Les flux monétaires annuels (FM) sont ensuite calculés :

$$FM(k) = (1 + i_e)^k \left[\int_{k-1}^k OPEX_r(t) dt - \int_{k-1}^k OPEX_p(t) dt \right] - \begin{cases} \frac{C(1 - R_{MF})i}{1 - (1 + i)^{-n_p}} & \text{si } k \leq n_p \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (3.5)$$

où k est l'indice annuel, i_e est le taux d'inflation annuelle de l'énergie, $OPEX_r$ est la facture énergétique annuelle du scénario de référence, $OPEX_p$ est la facture énergétique annuelle du scénario proposé, t est le temps, R_{MF} est le ratio de mise de fonds, i est le taux d'intérêt annuel du prêt, n_p est la durée d'amortissement du prêt.

La VAN est finalement calculée en actualisant les flux monétaires annuels :

$$VAN(n) = -C \cdot R_{MF} + \sum_{k=1}^n \frac{FM(k)}{(1 + a)^k} \quad (3.6)$$

où : n est la période considérée pour la VAN, a est le taux d'actualisation des flux monétaires.

Les paramètres économiques utilisés sont les suivants :

- Période (n) = 25 ans
- Taux d'actualisation (a) = 6%. Ce paramètre a été fixé suite à des communications personnelles avec un centre de services scolaires. Il correspond au taux qu'ils utilisent pour évaluer la rentabilité de leur projet.

- Taux d'inflation sur l'énergie (i_e) = 6%. Ce paramètre a été fixé d'après un rapport publié par l'Union des Consommateurs en août 2024 [69]. Ce rapport prévoit que le taux d'inflation de l'électricité résidentielle distribuée par HQ se situera entre 3% et 10% au cours des dix prochaines années. Il est supposé que toutes les sources énergétiques (électricité et gaz) sont assujetties au même taux d'inflation et que ce dernier est constant.
- L'investissement initial n'est pas financé ($R_{MF} = 1$) puisqu'il s'agit d'un projet public. Il n'y a donc pas de frais d'intérêts et les paramètres i et n_p n'ont pas été définis.
- Aucun réinvestissement n'est considéré dans la VAN.

3.5.6 Période de retour sur investissement

La PRI correspond à la période au terme de laquelle la VAN est nulle. C'est donc dire que l'investissement initial a été récupéré et que des profits seront réalisés à partir de ce moment. Cela s'exprime de la manière suivante :

$$VAN(t = PRI) = 0 \tag{3.7}$$

La PRI est donc assujettie aux mêmes paramètres économiques présentés pour la VAN.

CHAPITRE 4 PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET ÉNERGÉTIQUE

4.1 Décarbonation et puissance maximale appelée

Dans un premier temps, la performance environnementale et énergétique des sept scénarios est étudiée. Une chaudière au gaz naturel assure le chauffage des espaces du bâtiment existant. La figure 4.1 révèle qu'il s'agit du scénario avec les émissions de gaz à effet de serre les plus élevées ($93 \text{ tCO}_2\text{e}$). Sa puissance maximale appelée est toutefois la plus faible (36 kW) ce qui correspond aux charges de base du bâtiment (éclairage, équipements, eau chaude domestique, pompes et ventilateur).

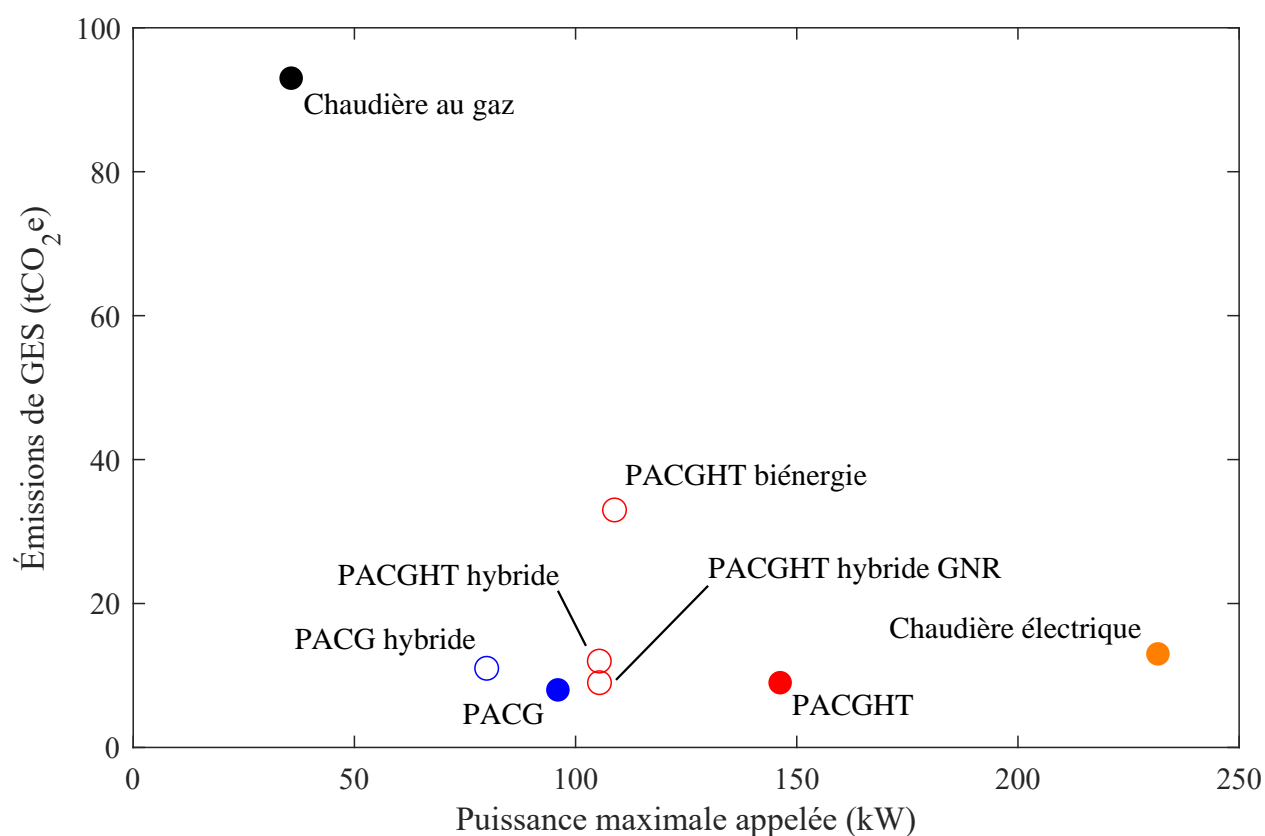


FIGURE 4.1 Émissions annuelles de GES et puissance électrique maximale appelée

Il est possible de décarboner simplement ce bâtiment en substituant la chaudière au gaz par une chaudière électrique. La figure 4.1 démontre que cette stratégie réduit les émissions de GES de 86% par rapport à l'existant en raison de la faible intensité carbone de l'électricité

québécoise. Cependant, cela règle un problème pour en créer un autre. La puissance maximale appelée est maintenant de 232 kW, soit plus de six fois la valeur du scénario chauffé au gaz. Dans un scénario hypothétique pour lequel le chauffage au gaz naturel serait remplacé par des équipements de chauffage à résistance électrique (tel que ce scénario), cette approche n'est pas viable à l'échelle du réseau de production et de distribution électrique qui est déjà saturé en périodes de pointe hivernale et ce, particulièrement en milieu urbain dense. La puissance maximale appelée pour le chauffage des bâtiments représente déjà 50% de la capacité des infrastructures d'Hydro-Québec ce qui limite la capacité à électrifier d'autres secteurs de l'économie plus émetteurs que les bâtiments (e.g. transport et industries) [14]. Les solutions décarbonées mises de l'avant devraient idéalement limiter au maximum la puissance maximale appelée.

C'est là que les cinq autres scénarios intégrant un système géothermique interviennent. Le scénario PACG conventionnel où tous les radiateurs sont remplacés par des unités basse température (50 °C) permet de réduire les émissions de GES de 91% par rapport à la chaudière au gaz. L'appel de puissance électrique est le plus faible des solutions tout à l'électricité (TAÉ) avec 96 kW. Le scénario PACGHT permet d'atteindre 90% de décarbonation pour une puissance maximale appelée de 146 kW ce qui se situe environ à mi-chemin entre la chaudière électrique et la PACG conventionnelle tout en conservant les radiateurs existants et les mêmes températures d'opération du réseau hydronique que la chaudière au gaz.

Les scénarios hybrides sont ensuite étudiés. La version hybride du scénario PACG présente une décarbonation de 88% par rapport à l'existant, soit pratiquement le même niveau que son homologue TAÉ. La puissance maximale appelée est toutefois la plus faible de tous les scénarios à l'étude avec 80 kW. Le scénario PACGHT hybride présente une puissance maximale appelée de 105 kW contre 146 kW pour son homologue TAÉ et ce, pour un niveau de décarbonation de 87%, soit pratiquement le même que le scénario PACGHT. On voit donc que les scénarios hybrides sont plus intéressants du point de vue de la puissance maximale appelée que leurs homologues TAÉ. Il en est ainsi puisque le chauffage d'appoint au gaz naturel s'active en périodes de pointe hivernales pour fournir de la chaleur au bâtiment simultanément avec les PAC qui demeurent en opération. Le niveau de décarbonation demeure sensiblement le même puisque le système géothermique couvre environ 95% des besoins annuels de chauffage ce qui se traduit par une faible consommation de gaz, soit moins de 1500 m³ dans les deux cas (voir tableau 3.5).

Deux autres scénarios hybrides complémentaires sont étudiés avec la PACGHT. D'abord, le scénario PACGHT hybride est repris, mais le gaz naturel consommé est remplacé par du GNR. L'utilisation du GNR permet d'atteindre 90% de décarbonation ce qui est un mince

gain de 2% en raison du faible volume de gaz consommé. Autrement, la puissance maximale appelée demeure inchangée. Ainsi, il ne semble pas y avoir d'intérêt notable à opter pour du GNR dans ce cas précis, si ce n'est dans le cadre d'une poursuite du « zéro carbone ».

Ensuite, une autre variante au scénario PACGHT hybride est ajoutée : la biénergie. Cette solution bénéficie d'un tarif préférentiel offert par Hydro-Québec en collaboration avec Énergir aux bâtiments dont le chauffage des espaces bascule entièrement vers le gaz naturel sous une certaine température ambiante ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour un bâtiment localisé à Montréal). Dans ce scénario, l'opération de la PACGHT n'est pas autorisée sous $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ce qui engendre l'augmentation des volumes de gaz consommé (9646 m^3). La réduction des GES est conséquemment de 65% ce qui est notablement moindre que toutes les autres solutions décarbonées à l'étude.

4.2 Intensité énergétique

En plus de la puissance maximale appelée, la consommation énergétique est un autre indicateur important pour quantifier la performance énergétique d'un bâtiment. Le tableau 4.1 présente l'intensité énergétique (IÉ) des scénarios à l'étude.

TABLEAU 4.1 Intensité énergétique

Description	IÉ (GJ/m^2)
Chaudière au gaz	1.0
Chaudière électrique	0.85
PACG	0.52
PACG hybride	0.52
PACGHT	0.59
PACGHT hybride	0.59
PACGHT hybride GNR	0.59
PACGHT biénergie	0.73

L'école existante qui est chauffée entièrement par une chaudière au gaz présente une IÉ de $1.0\text{ GJ}/\text{m}^2$. La substitution par une chaudière électrique permet de diminuer l'IÉ à $0.85\text{ GJ}/\text{m}^2$ en raison de son COP de 1 comparativement au COP de 0.80 de la chaudière au gaz. Un gain du COP de l'équipement de production de chaleur de 25% se traduit par une diminution de l'IÉ de 15% ce qui indique la grande contribution du chauffage des espaces dans la consommation énergétique du bâtiment (voir figure 4.2). Les scénarios PACG et PACG hybride présentent tout deux une IÉ de $0.52\text{ GJ}/\text{m}^2$. Cela s'explique par le fait que le surplus d'énergie de pompage du scénario TAÉ (notamment engendré par la pompe submersible du

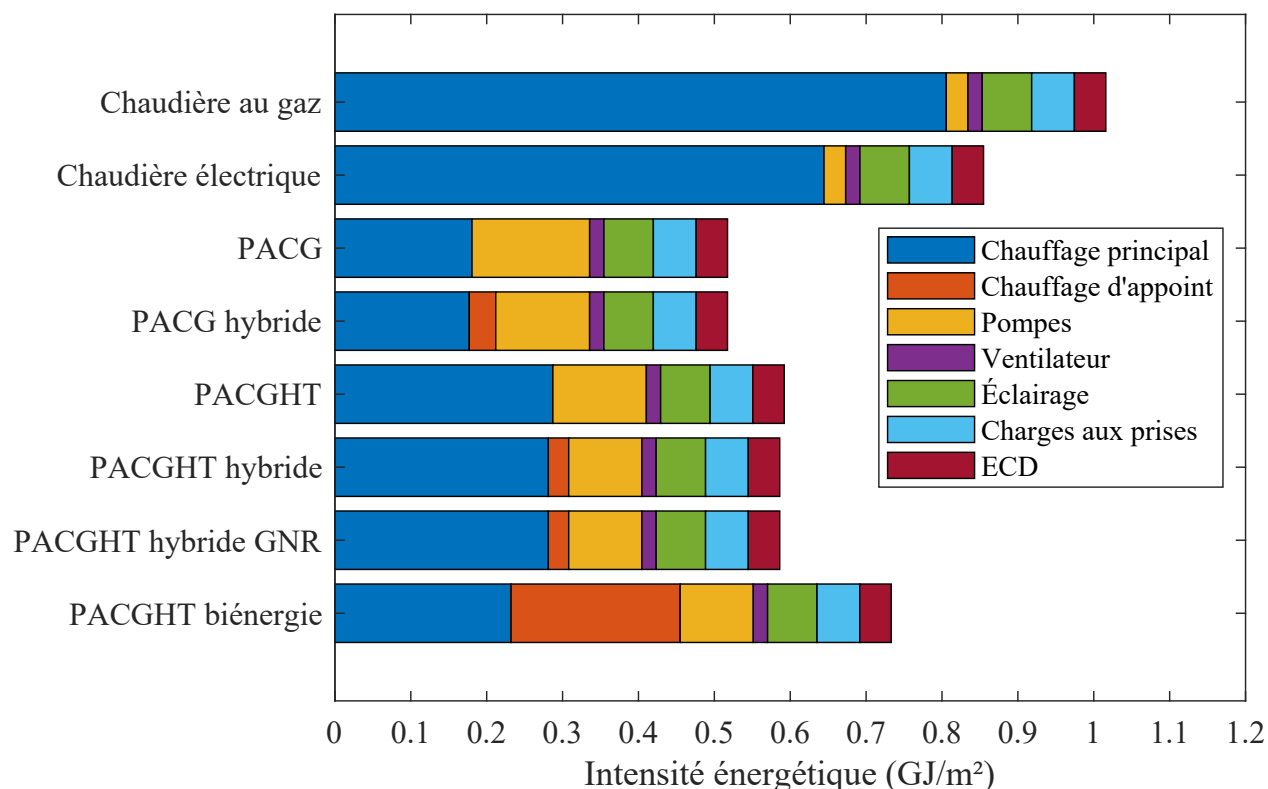


FIGURE 4.2 Intensité énergétique détaillée par poste de consommation

PCP supplémentaire) est approximativement égal à la consommation d'énergie du chauffage d'appoint dans le scénario hybride (voir figure 4.2). Rappelons que les pompes submersibles dans les PCP et les pompes du côté évaporateur et condenseur de la PACG sont à débit constant et qu'elles opèrent continuellement durant la saison de chauffage. L'énergie de pompage résultante est donc de 0.15 GJ/m^2 pour le scénario PACG ce qui est pratiquement autant que la PACG elle-même qui consomme 0.18 GJ/m^2 . Une étude récente sur l'opération d'un projet de démonstration de PCP dans une école primaire québécoise a démontré des résultats similaires [7]. Les pompes du côté source ont consommé autant que la PACG elle-même durant une saison de chauffage. Une autre étude menée au même site de démonstration a démontré que l'intégration de pompage à vitesse variable pouvait générer de 8 à 11% d'économies d'énergie supplémentaires par rapport à du débit constant [31]. L'opération à débit variable des pompes devrait être considérée dans tout projet d'efficacité énergétique. Cela n'a pas été fait dans le cadre de cette étude pour simplifier la modélisation. Il est à noter que l'algorithme de convolution implanté dans le modèle permettrait d'ajouter du débit variable dans le cadre de travaux de recherche futurs (conditions non stationnaires).

Le même phénomène est observé entre les scénarios PACGHT, PACGHT hybride et PACGHT hybride GNR qui présentent tous une IÉ de 0.59 GJ/m². Cette IÉ est plus élevée que les scénarios PACG en raison d'un SCOP plus faible de la PACGHT (voir tableau 4.2) qui doit fournir de la chaleur à plus haute température. Le scénario biénergie présente une IÉ de 0.73 GJ/m² ce qui est plus élevé que les autres scénarios décarbonés. La figure 4.2 révèle que l'usage accru du chauffage d'appoint au gaz naturel et sa faible efficacité de 0.80 expliquent cette augmentation de l'IÉ. Le chauffage d'appoint consomme autant que la PACGHT qui couvre pourtant 75% des besoins annuels de chauffage.

4.3 Coefficients de performance

Le coefficient de performance moyen de l'équipement de production de chaleur sur toute la saison de chauffage (SCOP) se définit comme l'énergie thermique totale fournie par l'équipement divisée par sa consommation d'énergie. Le coefficient de performance moyen du système de production de chaleur sur toute la saison de chauffage (SCOP_s) correspond à l'énergie thermique totale fournie par le système (équipements de chauffage principal et auxiliaire) divisée par la consommation de ces mêmes équipements, des pompes submersibles dans les PCP, de la pompe au condenseur de la PAC et de la pompe à l'évaporateur de la PAC (pour les scénarios géothermiques). Les pompes qui alimentent les émetteurs de chaleur et le serpentin sont ignorées dans le calcul puisque leur consommation d'énergie est égale dans tous les cas. Le SCOP et le SCOP_s des scénarios sont présentés au tableau 4.2.

TABLEAU 4.2 SCOP et SCOP_s

Description	SCOP	SCOP _s
Chaudière au gaz	0.80	0.80
Chaudière électrique	1	1
PACG	3.52	2.07
PACG hybride	3.53	2.13
PACGHT	2.24	1.67
PACGHT hybride	2.27	1.74
PACGHT hybride GNR	2.27	1.74
PACGHT biénergie	2.36	1.38

D'abord, l'analyse du tableau 4.2 indique que le SCOP du scénario PACG (3.52) est supérieur à celui pour le scénario PACGHT (2.24). Cette différence significative de 1.28 points (36%) s'explique par deux phénomènes visibles sur la figure 4.3 :

- La PACGHT doit produire de l'eau plus chaude pour satisfaire les points de consigne dans les zones du bâtiments en raison de l'utilisation des radiateurs existants. La courbe de chauffage dicte la température du fluide à la sortie du condenseur en fonction de la température ambiante (voir figure 3.3). Cela se traduit par des températures d'opération plus élevées au condenseur et donc un plus grand travail du compresseur pour comprimer le réfrigérant.
- Pour une même température à la sortie du condenseur, la PACG présente un meilleur COP que la PACGHT. Par exemple, pour une température de sortie au condenseur de 50 °C, la PACG présente un COP d'environ 3.0 alors que la PACGHT présente un COP d'environ 2.6. Cet effet est encore plus marqué pour de plus faibles températures au condenseur (e.g. 40 °C). Cela s'explique par le fait que ces deux PAC utilisent des compresseurs et des réfrigérants différents. La PACG utilise des compresseurs à spirale (« scroll ») et du réfrigérant R454B alors que la PACGHT utilise des compresseurs à pistons et du réfrigérant R450A qui sont optimisés pour une opération à haute température. Le comportement thermodynamique n'est donc pas le même.

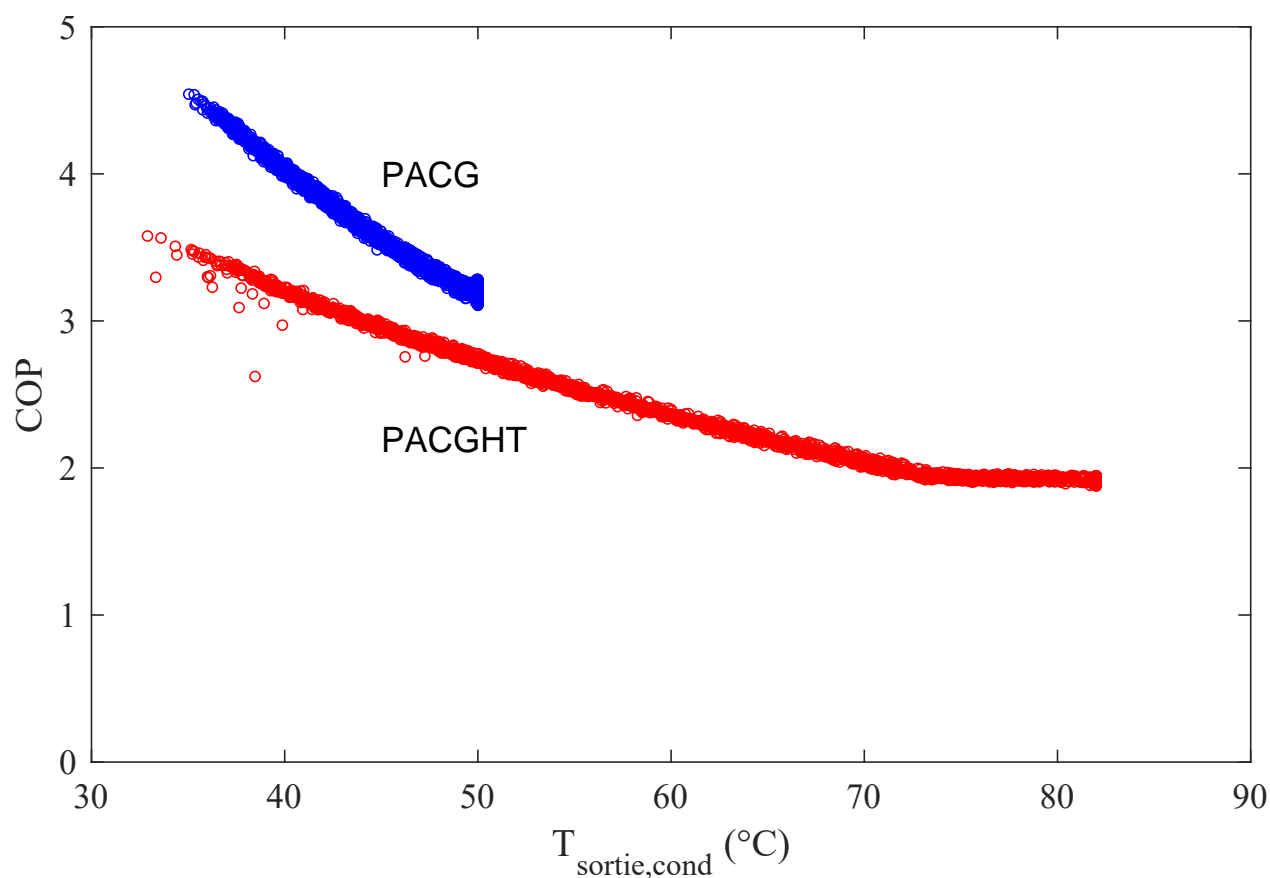


FIGURE 4.3 Distribution du COP selon la température à la sortie du condenseur pour les scénarios PACG et PACGHT

La figure 4.3 révèle également que le COP de la PACG et de la PACGHT varie exclusivement ou presque en fonction de la température à la sortie du condenseur. En effet, les coefficients de corrélation linéaire des deux distributions de données sont respectivement de -0.99 et -0.98 pour la PACG et la PACGHT. Il est surprenant de constater que la température à l'évaporateur affecte peu le COP. Deux éléments sont en cause :

- En chauffage, l'eau souterraine en circulation dans les PCP ne peut pas geler. La température à l'entrée des PCP en chauffage est donc limitée à 1 °C afin de conserver une marge de sécurité. La température non perturbée du sol est de 8.2 °C. La plage de température à l'entrée de l'évaporateur est donc d'environ 7 °C ce qui est relativement faible comparativement à celle au condenseur. En effet, la température de sortie au condenseur peut varier de 52 °C, soit entre 82 °C et 30 °C selon la courbe de chauffage.
- Les pompes du côté source des PAC opèrent constamment au débit de conception (voir tableaux 3.3 et 3.4). La différence de température à l'évaporateur est donc faible et s'amointrie à charge partielle. Rappelons que la température du réfrigérant à l'évaporateur doit être abaissée sous la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur pour permettre le transfert de chaleur.

Dans le domaine de la géothermie, de nombreuses études font varier le COP de la PACG en fonction de la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur sans considérer la température au condenseur. Bien que cela soit légitime avec une PAC eau-air, les variations au condenseur sont plus importantes avec une PAC eau-eau. Cette étude démontre l'importance de considérer également ce qui se passe du côté charge afin d'évaluer de manière juste la performance de la PACG et donc les charges à l'échangeur géothermique. Cela est d'autant plus vrai pour une PACGHT où la température au condenseur varie sur une large plage. Sans intégrer une modélisation détaillée de la boucle hydronique du côté charge ainsi que des émetteurs de chaleur comme cela a été fait dans cette étude, l'intégration de la courbe de chauffage serait une solution simple pour mieux évaluer la performance de la PACG.

Autrement, le tableau 4.2 indique que les scénarios hybrides présentent des SCOP comparables aux scénarios TAÉ. En effet, le scénario PACG présente un SCOP de 3.52 alors que le scénario PACG hybride présente un SCOP de 3.53. De la même manière, le scénario PACGHT présente un SCOP de 2.24 alors que le scénario PACGHT hybride présente un SCOP de 2.27. Cela s'explique par le fait que le chauffage d'appoint est utilisé seulement quelques heures par hiver pour combler 5% des besoins annuels de chauffage ce qui n'est pas suffisant pour affecter le SCOP. Le scénario PACGHT hybride biénergie présente un SCOP de 2.36. Ce gain de 0.09 points par rapport au scénario PACGHT hybride provient du fait que la PACGHT est hors fonction lorsque la température ambiante est sous -12 °C, soit pour un plus grand nombre d'heures et dans les moments où la température du fluide à la sortie du condenseur doit être

la plus chaude selon la courbe de chauffage (voir figure 3.3).

Ensuite, le $SCOP_s$ est analysé. Pour le scénario entièrement chauffé au gaz (existant) et la substitution par une chaudière électrique, le $SCOP_s$ est égal au SCOP puisqu'il n'y a pas de pompage du côté source de l'équipement de production de chaleur. Tous les scénarios géothermiques présentent une réduction significative du $SCOP_s$ par rapport au SCOP variant entre 23% et 42%. Deux éléments expliquent ces baisses :

- L'énergie de pompage importante en raison de l'opération à débit constant.
- L'utilisation d'un chauffage d'appoint inefficace dans le cas des scénarios hybrides.

Dans le cas du scénario PACG, cette réduction est de 41% ce qui se traduit par un $SCOP_s$ de 2.07. L'énergie de pompage importante pour ce scénario, qui comprend le plus grand nombre de PCP, est en cause (voir figure 4.2). Une étude récente démontre un $SCOP_s$ de 2.0 pour un système comparable [7]. Le scénario PACGHT présente un $SCOP_s$ de 1.67 ce qui représente une réduction de 25% par rapport à son SCOP. Cette baisse est moins marquée que pour le scénario PACG puisque l'énergie de pompage est moindre (un PCP de moins que PACG) et que la PACGHT présente déjà un SCOP plus faible.

Les scénarios hybrides présentent des $SCOP_s$ similaires à leurs homologues TAÉ. L'utilisation d'un chauffage d'appoint inefficace est compensée par l'énergie de pompage moins importante (voir figure 4.2). En effet, les systèmes géothermiques hybrides ont une capacité réduite en chauffage (120 kW par rapport à 200 kW) ce qui se traduit par des débits d'opération plus faibles et donc des pompes moins puissantes. Le scénario PACGHT biénergie présente la plus grande chute (42%) avec un $SCOP_s$ de 1.38 en raison de l'utilisation plus marquée de la chaudière au gaz inefficace comme chauffage d'appoint. Son $SCOP_s$ s'approche dangereusement de la chaudière électrique.

4.4 Synthèse

Ce chapitre s'est penché sur l'évaluation des performances environnementale et énergétique des scénarios à l'étude. Il a été démontré qu'une simple substitution par une chaudière électrique permet de décarboner à 86% un bâtiment en raison de la faible intensité carbone de l'électricité québécoise. Cela engendre néanmoins un problème de puissance maximale appelée à l'échelle du réseau électrique avec une valeur plus de six fois supérieure au bâtiment existant. L'utilisation de systèmes géothermiques adresse ce paradoxe. Si on suppose que l'on peut abaisser les températures d'opération du réseau hydronique grâce au remplacement des émetteurs de chaleur, on peut opérer une PACG conventionnelle. Cela engendre un gain de 1.28 points sur le SCOP par rapport à l'opération d'une PACGHT. Le scénario PACG présente ainsi une puissance maximale appelée (96 kW vs 146 kW) et une IÉ (0.52 GJ/m² vs

0.59 GJ/m²) plus faibles que le scénario PACGHT . Il a aussi été démontré que les systèmes hybrides, où une chaudière au gaz naturel assure l'écrêtage des pointes de chauffage, permet une réduction de la capacité installée de PAC et ainsi de la puissance électrique maximale appelée par celles-ci. Le scénario PACG hybride offre le meilleur compromis entre décarbonation et puissance maximale appelée parmi tous les scénarios étudiés. Une couverture de 60% de la puissance maximale en chauffage permet au système géothermique de rencontrer 95% des besoins de sorte que :

- Le niveau de décarbonation varie de moins de 2% par rapport au scénario TAÉ.
- La puissance maximale appelée est réduite de 16 kW (17%) par rapport au scénario TAÉ.
- L'IÉ est égale à celle du scénario TAÉ.

Le scénario PACGHT hybride arrive deuxième derrière le scénario PACG hybride avec une décarbonation à 87%, une puissance maximale appelée de 105 kW ce qui est loin derrière la chaudière électrique (232 kW) et une IÉ de 0.59 GJ/m². Il a aussi été démontré que l'utilisation du GNR plutôt que du gaz naturel fossile pour le scénario PACGHT hybride engendre un gain négligeable (2%) quant au niveau de décarbonation atteint. De son côté, le scénario PACGHT biénergie entraîne une réduction des émissions de GES de 65%, ce qui est significativement moins intéressant que les autres scénarios décarbonés à l'étude.

Ensuite, une diminution significative du SCOP_s par rapport au SCOP a été notée pour tous les scénarios géothermiques à l'étude révélant l'importance de minimiser la force motrice pour le pompage et d'intégrer du pompage à débit variable. Pour le scénario PACG, le SCOP est de 3.52 alors que le SCOP_s est de 2.07, soit une baisse de 41%. Les pompes consomment annuellement 0.15 GJ/m² soit pratiquement autant que la PACG elle-même qui consomme 0.18 GJ/m².

Finalement, il a été démontré qu'il est nécessaire d'intégrer minimalement la courbe de chauffage au modèle énergétique afin d'évaluer adéquatement la performance de la PAC et indirectement les charges à l'échangeur géothermique. En effet, la température au condenseur peut varier davantage que la température à l'évaporateur ce qui en fait le paramètre le plus influent sur le COP et la capacité en chauffage. Cela est d'autant plus vrai pour une PACGHT où la plage de température au condenseur est plus large avec des températures à la sortie du condenseur pouvant varier entre 30 °C et 82 °C.

CHAPITRE 5 PERFORMANCE ÉCONOMIQUE

Les principaux résultats de l'analyse économique sont présentés au tableau 5.1. Ils sont ensuite détaillés et expliqués dans leur section respective de ce chapitre.

TABLEAU 5.1 Résultats de l'analyse économique avec subventions

Scénario	CAPEX (k\$)	Subventions (k\$)	OPEX (k\$)	VAN (k\$)	PRI (années)
Chaudière électrique	277	104	58	-	-
PACG	1046	434	29	275	15
PACG hybride	866	340	28	400	12
PACGHT	832	361	38	208	15
PACGHT hybride	623	297	33	463	6
PACGHT hybride GNR	623	303	34	449	6
PACGHT biénergie	634	242	28	529	7

5.1 Investissement initial

Le tableau 5.2 présente le détail de l'investissement initial (CAPEX) avant taxes et subventions requis pour implanter les différents scénarios décarbonés. Les coûts sont répartis selon l'entrepreneur spécialisé qui réalise les travaux. L'analyse du tableau 5.2 montre que le coût pour l'entrepreneur en géothermie est proportionnel au nombre de PCP. Ainsi, le scénario PACG qui présente 4 PCP et un PI affiche la portée des travaux la plus dispendieuse pour le foreur (218 000\$) alors que le scénario PACGHT hybride qui présente 2 PCP et un PI affiche la moins dispendieuse (121 000\$).

Les coûts dans la catégorie PAC & tuyauterie sont plus importants pour les scénarios PACG étant donné que tous les radiateurs existants doivent être démantelés et remplacés par des nouveaux émetteurs à basse température ce qui occasionne des frais d'environ 200 000\$. Cet écart est amorti en partie par la PACG (1257\$/kW) qui coûte moins cher que la PACGHT (1585\$/kW). Il faut toutefois noter que la durée de vie anticipée pour la PACGHT (25 ans) est supérieure à celle de la PACG (20 ans) en raison de son compresseur à pistons de grade industriel. Ces durées de vie anticipées sont spécifiques aux modèles de PAC utilisés pour cette étude. Aucun réinvestissement n'a toutefois été intégré dans la VAN.

TABLEAU 5.2 Investissement initial détaillé

Scénario	Géothermie (k\$)	PAC & tuyauterie (k\$)	Électricité (k\$)	Contrôle (k\$)	Ventilation (k\$)	Total (k\$)
Chaudière électrique	0	50	35	5	151	241
PACG	218	574	24	84	10	909
PACG hybride	170	466	24	84	10	753
PACGHT	170	434	36	84	0	723
PACGHT hybride	121	301	36	84	0	541
PACGHT hybride GNR	121	301	36	84	0	541
PACGHT biénergie	121	301	46	84	0	551

Le coût en électricité pour le scénario chaudière électrique correspond essentiellement au remplacement de l'entrée électrique existante pour accommoder la puissance maximale appelée qui est beaucoup plus importante (voir section 4.1). Dans la même catégorie, le coût des scénarios PACGHT est supérieur aux scénarios PACG puisque la PACGHT d'Oilon étudiée n'est pas disponible à 600 V de sorte qu'un transformateur est requis. Le scénario biénergie est encore plus dispendieux en raison de la mise en place d'un deuxième compteur électrique dédié à la PACGHT. Il présente sinon le même CAPEX que le scénario PACGHT hybride.

Le coût en ventilation du scénario chaudière électrique comprend un système de climatisation refroidi à l'air afin de comparer des scénarios potentiellement capables de fournir un même niveau de confort thermique. En effet, tous les scénarios géothermiques ont l'infrastructure requise pour climatiser. Bien que la climatisation ne soit pas considérée dans le présent projet, il est important que le CAPEX reflète des scénarios comparables. De plus, il est improbable qu'une école subisse un rétrofit sans que de la climatisation soit ajoutée. Les coûts en ventilation pour les scénarios PACG correspondent au remplacement du serpentin de chauffage haute température qui traite les charges d'air frais par un nouveau serpentin basse température. Ces coûts ne sont pas requis dans le cas des scénarios PACGHT.

Les scénarios PACGHT hybride au gaz naturel fossile et au GNR présentent le même investissement initial. En effet, l'utilisation du GNR amène seulement des différences au niveau des coûts énergiques qui font l'objet de la prochaine section.

Tous comptes faits, l'utilisation d'une PACGHT réduit l'investissement initial de 20% par rapport à l'utilisation d'une PACG qui nécessite le remplacement des émetteurs de chaleur existants et l'aménagement de plus de PCP. Les scénarios hybrides requièrent aussi un investissement initial plus faible que leurs homologues TAÉ en raison d'une PAC de plus faible capacité et d'un nombre de PCP réduit. En effet, dans le cas des PACGHT une réduction de 25% est observée alors qu'elle est de 17% dans le cas des scénarios PACG.

Voir en annexe le détail de l'investissement initial pour chaque scénario.

5.2 Coûts énergétiques

Les coûts énergétiques (OPEX) sont présentés à la figure 5.1. La facture annuelle est répartie en trois composantes (voir sections 3.5.3 et 3.5.4) :

- L'achat des volumes de gaz naturel (fossile ou renouvelable) ;
- Le coût du volume d'électricité en kWh consommé ;
- Le coût de la puissance maximale appelée en kW.

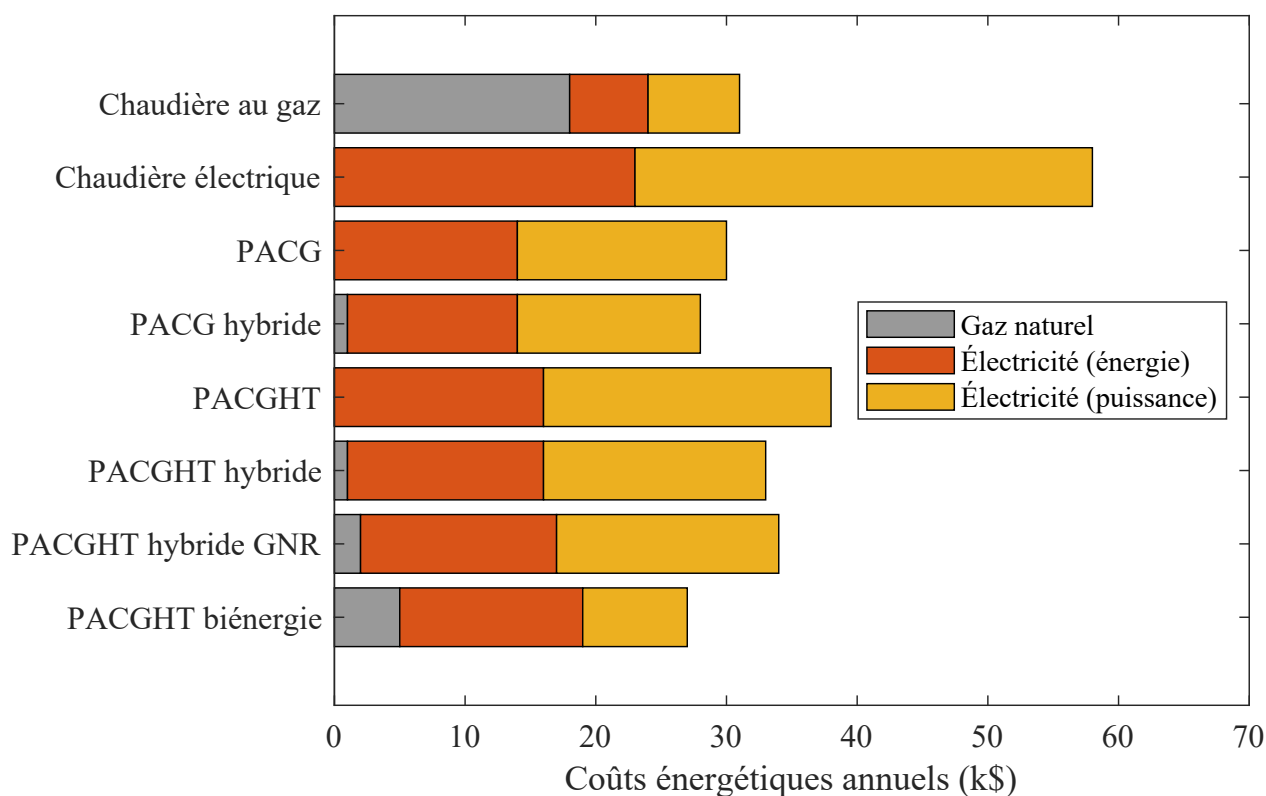


FIGURE 5.1 Coûts énergétiques annuels

L'école existante chauffée par une chaudière au gaz naturel présente une facture énergétique annuelle de 31 000\$ dont 60% est attribuable au gaz naturel. La substitution par une chaudière électrique fait exploser la facture à 58 000\$ dont 60% est cette fois attribuable à la puissance maximale appelée. Le tarif M d'Hydro-Québec est particulièrement pénalisant pour ce scénario étant donné que l'école est inoccupée en été, mais que 65% de la puissance maximale appelée au cours de l'hiver précédent est tout de même facturée. Il y a un bon potentiel d'économies financières pour les écoles qui gèrent efficacement leur puissance électrique.

Les scénarios PACG et PACG hybride présentent des factures respectives de 29 000\$ et 28 000\$, soit une réduction par rapport à l'existant chauffé au gaz naturel uniquement. Le même phénomène est observé pour le scénario PACGHT biénergie qui présente une facture de 28 000\$. Il est donc possible de décarboner tout en réduisant la facture du propriétaire.

Les scénarios PACGHT, PACGHT hybride et PACGHT hybride GNR présentent des factures respectives de 38 000\$, 33 000\$ et 34 000\$. Ils sont donc plus dispendieux à opérer sur le plan énergétique que l'existant avec une chaudière au gaz. On constate également la faible différence entre les factures au gaz naturel fossile et renouvelable (2%) malgré la grande différence sur le prix d'un m^3 . En effet, il en coûte 0.81 \$/ m^3 pour le gaz naturel fossile alors qu'il en coûte 1.49 \$/ m^3 pour le GNR (voir tableau 3.5). Le faible écart sur la facture annuelle s'explique par une consommation marginale de gaz naturel (1162 m^3).

Les scénarios hybrides affichent dans tous les cas des coûts énergétiques plus faibles que leurs homologues TAÉ. Le scénario PACG hybride arbore une réduction de 5% par rapport au scénario PACG alors que le scénario PACGHT hybride présente une réduction de 12% par rapport au scénario PACGHT. La réduction est plus marquée pour les PACGHT en raison de la puissance maximale appelée qui diminue davantage grâce à l'utilisation de l'appoint au gaz (voir figure 4.1). Ainsi, les scénarios hybrides sont plus intéressants du point de vue de la facture énergétique en plus d'abaisser l'investissement initial par rapport aux scénarios TAÉ. Ils sont inévitablement plus rentables.

5.3 Valeur actualisée nette

Maintenant que l'investissement initial et la facture énergétique ont été analysés séparément, il importe d'évaluer la rentabilité globale de chaque scénario en combinant CAPEX et OPEX. Cette rentabilité conjointe est évaluée via la VAN sur 25 ans d'opération. La figure 5.2 présente l'évolution dans le temps de ce paramètre économique alors que le tableau 5.1 présente les valeurs précises atteintes après 25 ans d'opération.

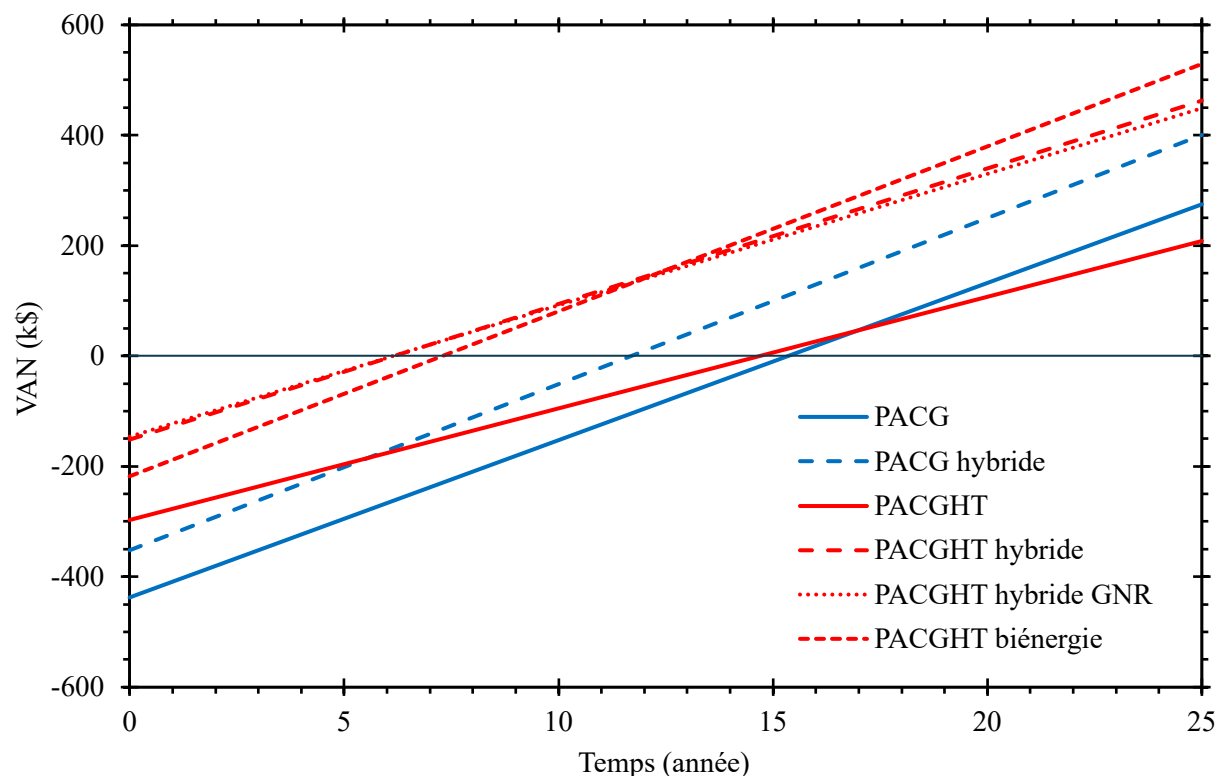


FIGURE 5.2 Évolution des VAN sur 25 ans

Au moment du projet de rétrofit ($t=0$), la VAN est négative pour tous les scénarios en raison de l'investissement initial requis pour implanter le système géothermique par rapport à l'implantation d'une chaudière électrique. Les scénarios PACG présentent les plus grands CAPEX et ils partent donc de plus loin avant d'atteindre la rentabilité, c'est-à-dire le moment où la VAN devient positive. C'est d'ailleurs ce laps de temps qui constitue la PRI, discutée dans la prochaine section.

Bien que le scénario PACG demande un investissement initial plus élevé que le scénario PACGHT, il présente des OPEX plus faibles et donc des économies plus grandes (pente plus abrupte sur la figure 5.2). Ainsi, après 17 ans d'opération, leurs VAN sont égales. Avant ce laps de temps, le scénario PACGHT est plus rentable bien que sa VAN soit négative pour la majorité de cette période (15 ans).

Un phénomène similaire se produit entre les scénarios PACGHT hybride et PACGHT biénergie. Le second présente un investissement initial plus élevé en raison de la nécessité d'implanter un compteur électrique dédié pour la PACGHT, mais il présente des OPEX plus faibles en raison de la tarification biénergie de l'électricité qui est plus avantageuse. Ainsi, après 12 ans, le scénario PACGHT biénergie devient plus rentable. C'est d'ailleurs le scénario

qui présente la VAN la plus élevée après 25 ans d'opération (529 000\$) alors que son plus proche concurrent, le scénario PACGHT hybride, arbore une VAN de 463 000\$. Il pourrait donc être tentant pour un propriétaire d'implanter ce scénario dans son bâtiment. Cela serait toutefois au détriment du niveau de décarbonation atteint. En effet, rappelons que le scénario PACGHT biénergie présente la moins bonne réduction des émissions de GES (65%) des scénarios décarbonés étudiés. Ce même ratio atteint 88% pour le scénario PACGHT hybride.

Par ailleurs, l'utilisation du GNR affecte de manière négligeable la VAN du scénario PACGHT hybride GNR. Cette courbe est pratiquement superposée à celle du scénario PACGHT hybride qui emploie du gaz naturel fossile. Après 25 ans, la faible différence entre les OPEX de ces deux scénarios se traduit par un écart entre leurs VAN de 14 000\$ en faveur du gaz naturel fossile. Rappelons que les niveaux de décarbonation atteints sont également similaires. Le scénario PACGHT hybride décarbure à 88% alors que le scénario PACGHT hybride GNR décarbure à 90%. Ici, un propriétaire du bâtiment pourrait choisir l'une ou l'autre des options sans impact significatif sur la facture énergétique ou le niveau de décarbonation de son bâtiment.

Après 25 ans d'opération, soit la durée de vie estimée de la PACGHT, les scénarios TAÉ sont significativement moins rentables que les scénarios hybrides. Le scénario PACGHT présente la VAN la plus faible, soit 208 000\$. Le scénario PACG n'est pas très loin devant avec 275 000\$.

L'analyse de la figure 5.2 révèle aussi que la VAN du scénario PACG hybride rattrape celle du scénario PACGHT hybride lorsque le temps augmente. Bien qu'après 25 ans la VAN de ce dernier scénario soit encore 63 000\$ supérieure, il y a un moment où le scénario PACG hybride deviendrait théoriquement plus intéressant. Le point d'intersection de ces deux courbes se situe à 34 années. Cela dit, il s'agit ici de la théorie puisque, au-delà de 25 ans, il serait requis d'intégrer des réinvestissements dans la VAN. En effet, autant la PACG que la PACGHT devrait être remplacée une fois pour arriver à 34 ans. D'ailleurs dans le cadre de cette étude économique, il a été supposé que la PACG présente une durée de vie de 25 ans comme la PACGHT. Réellement, la durée de vie estimée de la PACG est plus courte que celle de la PACGHT qui utilise un compresseur à pistons de grade industriel. À cet effet, aucun réinvestissement n'est considéré dans la présente analyse.

Tous comptes faits, la VAN sur 25 ans est l'indicateur économique principal de cette étude. Le scénario PACGHT biénergie est le plus rentable avec une VAN de 529 000\$ et ce, malgré un potentiel de décarbonation significativement moins intéressant que les autres scénarios. Le scénario PACGHT hybride est le deuxième plus rentable avec une VAN de 463 000\$ pour un niveau de décarbonation supérieur à la biénergie.

5.4 Période de retour sur investissement

La PRI est un indicateur économique complémentaire à la VAN. Il renseigne sur la rentabilité de chaque scénario à plus court terme que la VAN. Il intéresse les investisseurs soucieux de savoir après combien de temps leur investissement aura été remboursé et passera au vert. La PRI de chacun des scénarios à l'étude est présentée au tableau 5.1. Elle peut également être lue sur la figure 5.2 en observant le moment où la VAN est nulle.

Les scénarios TAÉ présentent tous deux une PRI d'environ 15 ans, soit la plus longue des scénarios à l'étude. Le scénario PACG hybride n'est pas loin devant avec une PRI de 12 ans. Cette valeur est significativement plus grande que les autres scénarios hybrides en raison de l'investissement initial qui est également élevé. En effet, la PRI est très sensible à l'investissement initial alors qu'elle l'est moins à la facture énergétique en raison du court laps de temps considéré (du moins plus court que les 25 ans de la VAN). Les économies sur la facture énergétique deviennent de plus en plus significatives dans le temps en raison de l'inflation. Pour cette même raison, le scénario PACGHT biénergie présente une PRI de 7 ans alors que les scénarios PACGHT hybride et PACGHT hybride GNR présentent la plus courte PRI de cette étude soit 6 ans. Il est à noter qu'une telle PRI est très intéressante pour un système géothermique qui permet à la fois de décarboner et de gérer efficacement la puissance maximale appelée.

5.5 Sensibilité à l'inflation

Un taux d'inflation sur l'énergie (gaz et électricité) de 6% a été employé jusqu'à maintenant. Il s'agit du taux le plus probable selon un rapport récent publié par l'Union de Protection des Consommateurs [69]. Ce même rapport présente des bornes pour l'inflation de l'électricité au Québec se situant à 3% et à 10%. La limite inférieure de 3% correspond à l'exigence de la loi qui gèle l'inflation sur l'électricité résidentielle au moment d'écrire ces lignes. Une analyse de sensibilité de la VAN au taux d'inflation énergétique a donc été menée. Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 5.3. À 3% d'inflation, les VAN de tous les scénarios sont moins élevées bien que toutes positives. Par exemple, la VAN du scénario PACGHT hybride qui était de 463 000\$ est maintenant de 280 000\$. Les scénarios PACG et PACGHT présentent maintenant des VAN respectives de 64 000\$ et 58 000\$.

À 10% d'inflation, les VAN de tous les scénarios augmentent significativement. La VAN du scénario biénergie double pratiquement par rapport à 6% d'inflation pour atteindre 1 035 000\$. Avec une inflation aussi importante, l'offre biénergie devient plus alléchante avec une avance de 156 000\$ sur le scénario PACGHT hybride. Peu importe l'inflation consi-

TABLEAU 5.3 Sensibilité des VAN à l'inflation

Scénario	3% (k\$)	6% (k\$)	10% (k\$)
Chaudière électrique	-	-	-
PACG	64	275	758
PACG hybride	177	400	909
PACGHT	58	208	550
PACGHT hybride	280	463	879
PACGHT hybride GNR	273	449	852
PACGHT biénergie	308	529	1035

dérée, les conclusions de l'analyse économique demeurent généralement inchangée. En fait, une seule conclusion change : le scénario PACG hybride (909 000\$) devient plus rentable que le scénario PACGHT hybride (879 000\$). En effet, le point de bascule se situe à un taux d'inflation de 9% où la VAN du scénario PACG hybride rejoint celle du scénario PACGHT hybride à 750 000\$. Toutefois, compte tenu que la différence de VAN n'est pas élevée (30 000\$) et que le taux d'inflation qui change la conclusion est proche de la limite supérieure de 10% (ce qui est peu probable de se produire), il est jugé raisonnable de croire que le scénario PACGHT hybride demeure un choix plus intéressant que le scénario PACG hybride.

Il est également intéressant de constater que l'implantation d'un système géothermique performant est une manière efficace pour un propriétaire de se protéger contre l'inflation de l'énergie.

5.6 Sensibilité aux subventions

Les subventions ont un côté anecdotique. Les subventions disponibles au moment de rédiger ont été considérées. Elles vont très probablement varier dans le temps. D'ailleurs, au moment d'écrire les dernières lignes de ce mémoire, le MEQ venait tout juste de suspendre pour une durée indéterminée la mesure 50646, incluse dans les résultats économiques présentés jusqu'ici. Le tableau 5.4 révèle d'ailleurs que cette mesure est la plus généreuse parmi celles à l'étude. Son retrait affecte inévitablement la rentabilité de tous les scénarios.

Le tableau 5.4 présente la subvention octroyée à chaque scénario via le programme OSE 5.0 d'Hydro-Québec. Pour les systèmes géothermiques, l'aide financière versée est proportionnelle à la capacité de chauffage au condenseur de la PAC aux conditions de conception (voir tableaux 3.3 et 3.4). Pour cette raison, les scénarios TAÉ présentent des subventions plus intéressantes que les scénarios hybrides. Ce programme est également plus généreux pour

TABLEAU 5.4 Subventions détaillées

Scénario	HQ OSE 5.0 (k\$)	Mesure 50646 (k\$)	Écoperformance (k\$)	Total (k\$)
Chaudière électrique	0	104	0	104
PACG	214	220	0	434
PACG hybride	129	212	0	340
PACGHT	144	217	0	361
PACGHT hybride	86	211	0	297
PACGHT hybride GNR	86	217	0	303
PACGHT biénergie	86	156	0	242

les PAC qui injecte de la chaleur dans un réseau basse température (moins de 55 °C selon HQ). Cela explique pourquoi le scénario PACG présente la subvention la plus élevée pour ce programme, soit 214 000\$. Cette subvention plus généreuse n'est pas étonnante puisque l'objectif d'HQ avec ses subventions est de réduire la puissance maximale appelée. La PACG sert mieux cette cause que la PACGHT en mode TAÉ (voir section 4.1). Il est à noter qu'au moment d'écrire ces lignes, la version OSE 5.1 est en vigueur depuis quelques jours. Toutefois, les montants demeurent inchangés par rapport à la version 5.0.

L'analyse du tableau 5.4 révèle aussi qu'aucunes subventions du programme Écoperformance de TEQ n'ont été considérées. Pour le volet implantation standard de ce programme, cela est dû au fait que le scénario de référence considéré correspond à l'existant. Une PRI maximale de 20 sans subventions est requise par rapport à l'existant pour bénéficier de cette aide financière. Aucun des scénarios décarbonés à l'étude ne respectent cette exigence. Plusieurs des scénarios décarbonés génèrent même une augmentation de la facture énergétique annuelle (voir figure 5.1) ce qui se traduit par une PRI négative lorsque le statu quo sert de référence. Cela est d'autant plus aberrant dans le cas d'une construction neuve où la référence n'est rien d'autre qu'un terrain vacant. Cela n'est toutefois pas d'intérêt dans le présent cas de rétrofit.

Pour le volet biénergie CI du programme Écoperformance, le scénario PACGHT biénergie y est admissible. Toutefois, cette subvention ne peut pas être cumulée avec la mesure 50646. Comme la mesure 50646 est plus généreuse de 6000\$, cette dernière a été privilégiée. Toutefois, comme la mesure 50646 n'est temporairement plus disponible au moment d'écrire ces lignes, la subvention biénergie CI prend le relais de sorte que le scénario PACGHT biénergie est nettement avantagé sur le plan économique. Pour combien de temps ? Personne ne le sait et

c'est la raison pour laquelle il a été jugé bon de répéter l'analyse économique sans considérer les subventions.

Le tableau 5.5 présente donc les principaux résultats sans les subventions afin de valider si les conclusions demeurent les mêmes. Le même taux d'inflation de 6% est employé.

TABLEAU 5.5 Résultats de l'analyse économique sans subventions

Scénario	CAPEX (k\$)	Subventions (k\$)	OPEX (k\$)	VAN (k\$)	PRI (années)
Chaudière électrique	277	0	58	-	-
PACG	1046	0	29	-56	27
PACG hybride	866	0	28	163	20
PACGHT	832	0	38	-49	27
PACGHT hybride	623	0	33	269	14
PACGHT hybride GNR	623	0	34	250	15
PACGHT biénergie	634	0	28	391	12

Le premier constat est que les scénarios PACG et PACGHT présentent maintenant des VAN négatives de -56 000\$ et -49 000\$ respectivement. Ces scénarios TAÉ voient leurs VAN chuter d'environ 120% par rapport aux valeurs avec subventions. Cette chute drastique s'explique par le fait qu'il s'agissait des scénarios bénéficiant des subventions les plus généreuses. Les subventions OSE d'Hydro-Québec étant proportionnelles à la capacité en chauffage de la PACG ou de la PACGHT. De plus, le scénario PACG qui bénéficiait de la plus grande subvention (434 000\$) est maintenant légèrement moins rentable que le scénario PACGHT alors que l'inverse était observé avec les subventions.

L'autre élément qui frappe aux yeux est que tous les scénarios ne sont pas affectés de la même manière. En effet, la rentabilité du scénario PACGHT biénergie est la moins dépendante des subventions. Sa VAN (391 000\$) présente une réduction de 26% ce qui est la plus faible baisse enregistrée. Cela est attribuable au fait que la mesure 50646 est moins généreuse (156 000\$) puisque le montant alloué est proportionnel à la réduction des GES par rapport à l'existant. Tel que mentionné précédemment, le scénario biénergie présente la moins bonne performance environnementale des scénarios décarbonés à l'étude. La tarification biénergie est très avantageuse puisqu'elle élimine l'importante partie de la facture énergétique liée à la facturation minimale de 65% de la puissance maximale appelée en période de pointe hivernale (voir figure 5.1). Autrement, le scénario PACGHT hybride présente une VAN de 269 000\$ ce qui en fait le plus proche concurrent du scénario biénergie.

Les PRI sont également très sensibles aux subventions. En effet, le scénario PACGHT hybride présente maintenant une PRI de 14 ans alors que cette même valeur était de 6 ans en considérant les subventions. Dans le milieu institutionnel, un projet avec une telle PRI est susceptible d'aller tout de même de l'avant. Toutefois, dans le secteur commercial, il y a fort à parier qu'un tel projet serait rapidement écarté puisqu'une rentabilité à plus court terme est recherchée. Les organismes subventionnaires ont donc un réel pouvoir sur l'implantation ou pas de mesures de décarbonation. À l'heure où la majorité des propriétaires de bâtiments pensent encore en dollars et où les cadres réglementaires nivellent par le bas, les subventions sont réellement la carotte au bout du bâton de la décarbonation. Elles sont ni plus ni moins le moteur de la lutte aux émissions de GES.

5.7 Synthèse

En somme, l'analyse économique révèle que le scénario PACGHT biénergie est le plus rentable avec une VAN de 529 000\$ et une PRI de 7 ans. Il est également le scénario le moins dépendant aux subventions. Il présente la VAN la plus élevée et ce, peu importe le taux d'inflation énergétique considéré (entre 3% et 10%).

Le scénario PACGHT hybride suit non loin derrière avec une VAN de 463 000\$ et la meilleure PRI de tous les scénarios soit 6 ans (ex aequo avec PACGHT hybride GNR). Sa rentabilité est toutefois dépendante des subventions allouées comme c'est le cas pour tous les autres scénarios d'ailleurs à l'exception du scénario PACGHT biénergie.

Les scénarios TAÉ sont à tous égards les moins rentables à l'étude. Les systèmes hybrides sont nettement plus rentables pour des performances environnementale et énergétique comparables.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

6.1 Considérations pratiques

Les résultats des modélisations environnementale, énergétique et économique ont respectivement été présentés aux chapitres 4 et 5. Le concept PACGHT étant nouveau, cette section traite des considérations pratiques entourant l'implantation de cette solution de décarbonation dans un bâtiment existant. Une solution de décarbonation peut être performante, mais encore faut-il qu'elle soit facile à mettre en oeuvre afin d'assurer un déploiement à grande échelle. Au fil des recherches et de discussions avec des centres de services scolaires, il a été découvert que de nombreux enjeux techniques vécus sur des projets de décarbonation institutionnels peuvent être évités grâce à l'implantation d'une PACGHT.

D'abord, les centres de services scolaires sont contraints de réaliser leur projet de retrofit d'écoles existantes en dehors des périodes d'occupation, ce qui se résume aux vacances scolaires estivales. Cela ne laisse qu'une courte période d'environ deux mois (juillet et août) pour réaliser des projets majeurs. Ces projets doivent bien souvent être séparés en phases ce qui augmente la complexité, la gestion, le nombre d'intervenants impliqués et les risques de mauvaise coordination entre les phases. De plus, cela crée une vague de travail en période estivale pour les entrepreneurs. La loi de l'offre et de la demande suggère que cela mène inévitablement à des soumissions plus élevées pour réaliser les travaux.

L'implantation d'une PACGHT est une solution « plug-and-play ». Elle peut être directement raccordée en injection sur le collecteur existant sans remplacer les émetteurs de chaleur dans toutes les zones occupées du bâtiment. Les interventions sont ainsi contenues dans la salle mécanique et dans la zone extérieure sélectionnée pour aménager l'échangeur géothermique. L'impact sur les occupants est minimisé et la réalisation de travaux en occupation peut être envisagée. Il est donc pensable de réaliser le projet de retrofit en une seule phase, avec un seul entrepreneur et en bénéficiant de conditions de marché plus favorables. Les travaux pourraient par exemple s'échelonner du mois de mai au mois de septembre inclusivement, soit hors de la saison de chauffage. Cela représente une fenêtre de cinq mois pour réaliser le projet plutôt que de deux mois comme c'est le cas avec l'implantation d'une PACG. L'effet des conditions de marché sur l'investissement initial n'est pas pris en compte dans ce projet de recherche. Il pourrait avantager les PACGHT par rapport au PACG. De plus, la portée des travaux simplifiée raccourcit la durée du projet ce qui permettrait à un entrepreneur de faire plus de projets de décarbonation dans une année. Cette rapidité d'exécution est un avantage indéniable à l'heure où le Québec est en voie de manquer ses cibles de réduction de GES.

Plusieurs centres de services scolaires ont des édifices patrimoniaux (parfois centenaires) dans leur parc immobilier. Les enveloppes de ces bâtiments (e.g. maçonnerie) peuvent se dégrader rapidement lorsque des changements sont notamment apportés au système de chauffage (e.g. remplacement des émetteurs de chaleur ou modification de la courbe de chauffage). L'utilisation de PACGHT permet de conserver les émetteurs de chaleur existants et les températures d'opération qui ont fait leurs preuves pour protéger l'enveloppe. Ainsi, dans certains cas, l'implantation d'une PACGHT pourrait s'avérer être la seule solution pour décarboner un bâtiment patrimonial avec un impact acceptable sur la puissance maximale appelée, tout en évitant une rénovation majeure de l'enveloppe. Ces interventions sont colossales en terme de budget, d'impact sur les occupants et d'enjeux liés à l'amiante souvent présente dans de tels bâtiments.

Selon des données du MERN datant de l'année scolaire 2016-2017, seulement 9% des écoles québécoises sont climatisées sur la majorité de leur superficie [16]. Une étude récente menée par l'Agence américaine de protection de l'environnement révèle que la chaleur en classe a un effet sur les résultats des élèves. En effet, Une augmentation de 2°C causée par le réchauffement climatique est associée en moyenne à une réduction de la réussite scolaire de 4% par élève. Une difficulté accrue à se concentrer, à retenir l'information et même un taux d'absentéisme plus élevé dans un contexte de chaleur accablante ont été mis en lumière [70]. Bien que ce projet de recherche se penche exclusivement sur le chauffage, l'implantation d'une PACGHT pour décarboner une école représenterait potentiellement une opportunité d'ajout de climatisation. En effet, un système géothermique hybride couvrant 60% de la puissance maximale en chauffage d'une école primaire aura bien souvent une capacité suffisante pour la climatiser. En fait, il est même souhaitable d'ajouter de la climatisation dans le cadre du même projet afin de limiter le déséquilibre des charges au sol et donc la dérive de la température du sol dans le temps. Un échangeur géothermique dont le volume d'énergie extrait (chauffage) annuellement est similaire au volume d'énergie injecté (climatisation) aura une longueur totale moindre et donc un coût de construction plus faible. Cela est vrai pour des PBF, mais également pour des PCP aménagés dans des unités hydrostratigraphiques peu perméables. Ainsi, ajouter de la climatisation dans le cadre du même projet de retrofit fait d'une pierre, deux coups : les élèves performant mieux en raison d'un confort thermique accru et l'échangeur géothermique est moins dispendieux. De plus, il est relativement simple d'intégrer la climatisation aux scénarios géothermiques. Il est aussi économique de le faire puisqu'il n'est pas requis de déboursier pour une infrastructure de rejet de chaleur ; l'échangeur géothermique s'en charge sans frais supplémentaires.

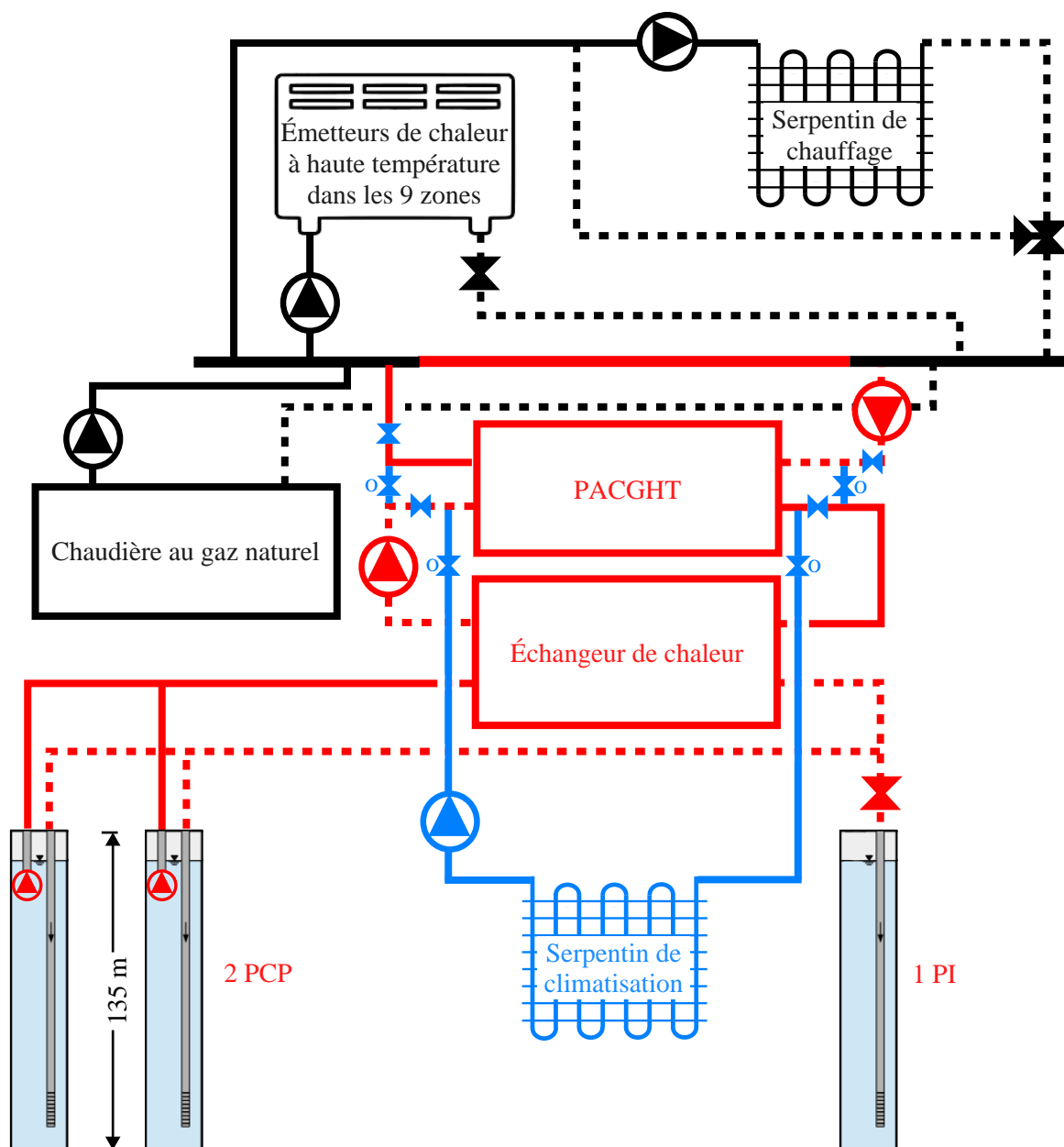


FIGURE 6.1 Schéma CVCA simplifié du scénario PACGHT hybride avec climatisation. Les modifications sont représentées en bleu. La mention « o » indique que la valve motorisée est ouverte en mode climatisation.

La figure 6.1 illustre les modifications à apporter au scénario PACGHT hybride pour climatiser l'école.

- Un jeu de vannes motorisées permet de connecter l'échangeur géothermique au condenseur de la PACGHT plutôt qu'à l'évaporateur. Ces vannes sont nécessaires puisque la PACGHT n'est pas réversible au niveau de son cycle de réfrigération directement.

- Un serpentin de refroidissement est ajouté dans l'unité de traitement d'air existante ou même dans la gaine de ventilation principale.
- Une paire de tuyauteries isolées et une pompe relient l'évaporateur de la PACGHT au serpentin de refroidissement sont ajoutées.

Dans le cas typique où toutes les zones (internes et externes) sont desservies par une seule et même unité de traitement d'air, il est souhaitable de positionner le serpentin de refroidissement en amont du serpentin de chauffage existant afin de permettre la déshumidification de l'air. L'énergie rejetée au condenseur peut réchauffer l'air déshumidifié afin de l'alimenter à une température neutre. Cela représente une option alternative pour ajouter un certain niveau de confort tout en évitant des travaux sur le réseau de distribution d'air dans les zones occupées du bâtiment.

Si la chaudière au gaz naturel existante est en bon état, il est possible de la conserver comme chauffage d'appoint dans le cas de l'implantation d'une PACGHT hybride. C'est d'ailleurs ce qui a été considéré pour cette étude. En effet, comme les températures d'opération du réseau (courbe de chauffage) demeurent les mêmes, il n'y a pas d'enjeux d'incompatibilité liés à l'opération de réseaux avec des températures différentes. Cela simplifie également les séquences de contrôle. La courbe de chauffage existante est conservée. Lorsque la PACGHT n'arrive plus à maintenir le point de consigne à la sortie du condenseur dicté par la courbe de chauffage (e.g. 82 °C en périodes de pointe hivernale), la chaudière au gaz vient simplement injecter la chaleur manquante dans le réseau des émetteurs de chaleur jusqu'à l'atteinte du point de consigne. La réutilisation de la chaudière existante limite les coûts de construction tout en assurant une pleine redondance en chauffage. Cette diversité des sources énergétiques pour le chauffage est également intéressante en cas de panne électrique notamment.

Il est également important de comprendre que les scénarios PACGHT ne représentent pas nécessairement la fin de l'histoire d'un projet de rétrofit. Si ultérieurement, le bâtiment est rénové pour remplacer les émetteurs de chaleur par des unités à basse température, la PACGHT augmentera alors sa performance (COP) et la puissance électrique maximale appelée s'abaissera. En contre-partie, la demande au sol augmentera et il faudra peut-être ajouter un PCP ou réaliser des mesures d'économie d'énergie pour réduire la demande de chauffage. Les PACGHT peuvent donc représenter une opportunité pour reporter dans le temps une partie de l'investissement initial tout en décarbonant efficacement dès maintenant.

Finalement, les PACGHT produisent un fluide suffisamment chaud pour la production d'ECD (60 °C). Cela n'a pas été exploré dans le cadre de cette étude puisque la consommation énergétique pour l'ECD est négligeable dans une école primaire. Toutefois, il y aurait un potentiel intéressant à explorer pour d'autres types de bâtiments tels que les écoles secondaires mu-

nies d'un centre sportif ou encore les immeubles multi-résidentiels. Les PACGHT pourraient représenter une avenue pour décarboner efficacement la production d'ECD. De plus, l'ECD génère des besoins de chauffage en toute saison de sorte qu'il serait possible de valoriser les rejets thermiques engendrés par la climatisation des espaces.

L'ensemble des points soulevés dans cette section représentent des pistes pour poursuivre ce projet de recherche.

6.2 Performance globale

Au chapitre 4, les performances environnementale et énergétique du scénario de référence et de sept scénarios de décarbonation d'un prototype d'école primaire ont été abordées. Au chapitre 5, la performance économique de ces mêmes scénarios a été étudiée. La section 6.1 du présent chapitre a traité des considérations pratiques entourant l'implantation d'une PACGHT dans une école. La présente section se veut une synthèse de ces deux chapitres et de la précédente section afin d'évaluer la performance globale des scénarios dans le but d'orienter les parties prenantes impliquées dans la décarbonation des bâtiments québécois munis d'émetteurs de chaleur à haute température.

Le scénario où la chaudière au gaz existante est substituée par une chaudière électrique a rapidement été identifié comme une solution à proscrire. En effet, bien que ce scénario permettent une réduction des émissions de GES de 86% par rapport à l'existant, il augmente la puissance maximale appelée de plus de six fois (232 kW vs 36 kW). Cela se traduit par une facture énergétique annuelle de 58 000\$ soit pratiquement le double de la facture de l'existant (31 000\$). D'ailleurs, ce scénario a servi de référence pour le calcul de la VAN. Les VAN sur 25 ans de tous les scénarios géothermiques sont positives ce qui révèle qu'ils sont plus rentables à moyen terme que l'implantation d'une chaudière électrique. Cela est d'autant plus vrai lorsque le taux d'inflation considéré augmente. Les centres de services scolaires ont donc tout intérêt à éviter la mise en place de cette solution qui ne fait que remplacer un problème par un autre.

Le scénario PACG permet de décarboner à environ 90% le bâtiment et présente la plus faible puissance maximale appelée des scénarios TAÉ (96 kW). Il est néanmoins le plus dispendieux à implanter. Il est le seul des scénarios étudiés à nécessiter un investissement initial dépassant 1 000 000\$ en raison du remplacement des émetteurs de chaleur existants par des nouvelles unités basse température et de son échangeur géothermique plus long. Cela permet toutefois à la PACG d'opérer à des températures plus faibles au condenseur ce qui se traduit ultimement par un SCOP de 3.52, soit 36% de plus qu'une PACGHT. Il a

même été démontré que, pour des conditions similaires à l'évaporateur et au condenseur, la PACG présente un meilleur COP. Cette performance thermodynamique accrue engendre une facture énergétique annuelle de 29 000\$, ce qui est inférieur à la facture du bâtiment existant et présentant des émissions de GES élevées. Cela se traduit par une PRI de 15 années et une VAN de 275 000\$ malgré d'importantes subventions de 434 000\$ couvrant plus de 40% de l'investissement initial. L'implantation de cette solution nécessite des interventions dans toutes les zones occupées de l'école ce qui est intrusif pour les occupants.

Le scénario PACGHT est le deuxième scénario géothermique TAÉ. Il permet d'atteindre un niveau de décarbonation similaire au scénario PACG, mais pour une puissance maximale appelée plus importante (146 kW). Un plus faible COP, particulièrement en période de pointe hivernale alors que les émetteurs de chaleur existants ont besoin d'un fluide à 82 °C, explique ce phénomène. Le SCOP est de 2.24. Ce SCOP plus faible réduit néanmoins la chaleur extraite du sol ce qui se traduit par un échangeur géothermique plus court de 25% (un PCP) et donc moins dispendieux. Ce phénomène, en plus de la réutilisation des émetteurs de chaleur existants, permet de réduire l'investissement initial de plus de 200 000\$. La facture énergétique est la plus élevée des scénarios géothermiques (38 000\$) en raison du tarif M qui fait payer la puissance maximale appelée durant toute l'année. Au final, ce scénario est moins rentable que son compétiteur PACG avec une VAN de 208 000\$. Notons toutefois que les subventions pour ce scénario sont moins généreuses que pour la PACG. En ne tenant pas compte des appuis financiers, la rentabilité de ces deux scénarios est similaire.

Les précédents paragraphes ont traité des scénarios TAÉ. Cette étude a toutefois démontré qu'il est préférable d'implanter des solutions géothermiques hybrides pour les raisons suivantes :

- Pour un niveau de décarbonation similaire (sauf pour le scénario PACGHT biénergie), les scénarios hybrides présentent une puissance maximale appelée plus faible en raison de l'utilisation d'un chauffage d'appoint au gaz naturel en période de pointe. Cela réduit la pression sur les infrastructures électriques nationales tout en générant des économies sur la facture énergétique du propriétaire.
- L'investissement initial est abaissé puisque le système géothermique est de plus petite capacité (60% de la charge maximale de chauffage) ce qui permet le retrait d'un PCP par rapport au scénario TAÉ correspondant. Ce dernier permet néanmoins de couvrir la majorité des besoins annuels de chauffage (95% pour les scénarios PACG hybride et PACGHT hybride).
- L'IE est similaire entre les scénarios TAÉ et hybrides correspondants.
- L'intensité carbone de l'électricité québécoise augmente en période de pointe hivernale alors que des importations sont nécessaires pour satisfaire les besoins à l'échelle

de la province. Cette électricité, souvent produite dans des centrales thermiques aux États-Unis, est significativement moins propre que l'hydroélectricité québécoise. Ainsi, dans ces moments, il devient pertinent d'utiliser une chaudière au gaz naturel directement sur le site. Cela encourage par le fait même l'économie locale. Ce phénomène n'a toutefois pas été étudié dans le cadre de ce projet de recherche qui suppose que l'intensité carbone des sources énergétiques est constante et égale à la moyenne annuelle. Il pourrait être intéressant de se pencher sur cette question.

- Les scénarios hybrides bénéficient d'une diversité énergétique et d'une redondance en chauffage ce qui augmente la résilience du système énergétique et sa capacité à s'adapter à des événements météorologiques extrêmes (de plus en plus fréquents sous l'effet des changements climatiques). Il serait notamment pensable de chauffer le bâtiment avec la chaudière au gaz naturel en cas de panne électrique ou en cas de panne mécanique du système géothermique. Une génératrice serait requise pour alimenter les pompes et les systèmes de contrôle, ce qui représente une petite charge électrique comparativement à une PAC ou encore une chaudière électrique.
- Avoir une chaudière au gaz naturel en appoint permet de limiter le surdimensionnement du système géothermique. Les ingénieurs praticiens ajoutent généralement des facteurs de sécurité à un calcul de charges déjà conservateur (les gains internes sont ignorés et des charges non coïncidentes sont additionnées) afin de s'assurer qu'un équipement de production de chaleur ne manque pas de capacité. Dans le cas d'un système hybride, ce surdimensionnement peut être appliqué au chauffage d'appoint au gaz naturel peu dispendieux en comparaison avec le système géothermique. Le système géothermique peut donc être dimensionné plus finement sans se soucier d'un éventuel manque de capacité. Cela se traduit par une réduction de l'investissement initial. Ce phénomène n'a pas été considéré pour cette étude théorique, mais il favoriserait les scénarios hybrides dans le cadre d'un projet réel.

Le tableau 6.1 compare donc les caractéristiques principales des scénarios PACG hybrides qui sont jugés les plus intéressants pour décarboner un bâtiment existant. Une valeur qui se démarque positivement des autres pour une caractéristique donnée est identifiée en vert alors qu'une valeur qui se démarque négativement des autres est identifiée en rouge.

La tarification biénergie est avantageuse sur le plan économique avec une facture énergétique annuelle de 28 000\$ soit moins que le bâtiment existant et la VAN la plus élevée de tous les scénarios (529 000\$). Cette tarification empêche cependant l'opération de la PACGHT sous -12 °C ce qui fait exploser la consommation de gaz et l'IE. Le niveau de décarbonation atteint par ce scénario est donc significativement moindre que les autres scénarios. Dans un contexte où la carboneutralité est visée d'ici 2050 et où il est nécessaire de prendre des actions im-

TABLEAU 6.1 Comparaison des caractéristiques techniques et économiques des scénarios géothermiques hybrides

Caractéristique	PACG hybride	PACGHT hybride	PACGHT hybride GNR	PACGHT biénergie
Niveau de décarbonation (%)	88	87	90	65
Puissance maximale appelée (kW)	80	105	105	109
Consommation de gaz naturel (m ³)	1511	1162	1162	9646
IÉ (GJ/m ²)	0.52	0.59	0.59	0.73
SCOP	3.53	2.27	2.27	2.36
SCOP _s	2.13	1.74	1.74	1.38
CAPEX (k\$)	866	623	623	634
Subventions (k\$)	340	297	303	242
OPEX (k\$)	28	33	34	28
VAN (k\$)	400	463	449	529
PRI (années)	12	6	6	7
Travaux dans la salle mécanique seulement	Non	Oui	Oui	Oui
Intégration avec enveloppe patrimoniale	Non	Oui	Oui	Oui
Ajout de climatisation	Oui	Oui	Oui	Oui
Production d'ECD	Non	Oui	Oui	Oui

minentes pour lutter contre les changements climatiques, cette solution n'est pas attrayante. Il convient de mentionner qu'un scénario couplant la biénergie et du GNR permettrait d'atteindre un niveau de décarbonation comparable aux autres scénarios hybrides (86%). La facture énergétique annuelle augmenterait alors à près de 35 000\$ soit plus élevée que tous les autres scénarios hybrides. Ce scénario perdrait alors son avantage économique. De plus, ce GNR pourrait plutôt bénéficier à d'autres secteurs de l'économie où la décarbonation est plus difficile (e.g. industries avec des procédés à très haute température). Dans le cas présent, il sert plutôt à compenser le fait qu'un système géothermique performant et décarboné est sous-exploité pour bénéficier d'une tarification énergétique avantageuse. Prendre note que le scénario PACGHT biénergie pourrait être envisagé dans un premier stade d'opération pour améliorer la rentabilité du projet tout en réalisant un certain niveau de décarbonation (65%). Lorsqu'un niveau supérieur de décarbonation est nécessaire, le transfert vers le

scénario PACGHT hybride et la tarification associée pourrait alors être envisagé.

Le scénario PACGHT hybride utilisant du GNR présente une performance globale pratiquement identique à la version utilisant du gaz naturel fossile. Il n'y a aucune différence sur la performance énergétique. Au niveau des performances environnementale et économique, les différences observées sont minimales puisque la PACGHT répond à 95% des besoins annuels de chauffage. Ces deux scénarios sont donc jugés équivalents et il revient au propriétaire de décider de la pertinence ou non de consommer du GNR plutôt que du gaz naturel fossile. Des raisons plus politiques que techniques pourraient motiver l'orientation vers l'une ou l'autre de ces solutions décarbonées.

Il convient maintenant de départager entre les scénarios PACG hybride et PACGHT hybride.

- Au niveau de la performance environnementale, la différence est marginale. Il importe toutefois de mentionner que, dans un contexte où l'électricité présenterait une intensité carbone plus élevée comme c'est le cas dans d'autres provinces canadiennes et ailleurs dans le monde, le scénario PACG hybride deviendrait plus intéressant. D'autre part, seules les émissions de GES liées à la consommation d'énergie ont été considérées dans cette étude. L'utilisation d'une PACGHT évite le remplacement des émetteurs de chaleur ce qui aurait un impact sur le carbone intrinsèque. Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier cet aspect.
- Au niveau de la performance énergétique, tous les indicateurs penchent en faveur du scénario PACG hybride. La puissance maximale appelée est plus faible de 24%, l'IE est plus faible de 12%, le SCOP est plus élevé de 56% et le SCOP_s est plus élevé de 22%.
- Au niveau de la performance économique, tous les indicateurs penchent en faveur du scénario PACGHT. L'investissement initial est plus faible de 39%, la VAN sur 25 ans est plus élevée de 14% et la PRI est plus courte de 100%. Le tout malgré des subventions plus élevées pour le scénario PACG hybride. Seule la facture énergétique est plus faible pour le scénario PACG hybride. Cet écart n'est toutefois pas suffisant pour rattraper l'investissement initial supplémentaire comme en témoigne la VAN sur 25 ans.

Il est donc difficile de trancher sur lequel de ces deux scénarios hybrides est le meilleur pour décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur haute température. La réponse dépend des objectifs du propriétaire du bâtiment. Un centre de services scolaires, pour qui l'abaissement de la consommation énergétique de son parc immobilier primerait sur la rentabilité financière, pourrait s'orienter vers la solution PACG hybride. Si l'inflation sur l'électricité atteignait 10%, ce scénario deviendrait même plus rentable que le scénario PACGHT hybride. Cela est toutefois peu probable. À plus long terme (e.g. 50 ans), il faudrait

également que des réinvestissements soient inclus dans le calcul de la VAN. Comme la durée de vie estimée de la PACG est plus courte que la PACGHT d'environ cinq ans, le scénario PACGHT serait avantagé.

À l'heure où la crise climatique est sur toutes les lèvres et où le déficit économique du Québec ne cesse de grandir, il apparaît plus raisonnable que les centres de services scolaires et que les propriétaires de manière plus générale aient plutôt ces deux objectifs principaux lors de la réalisation d'un projet de rétrofit :

- Décarboner le bâtiment.
- Maximiser la rentabilité à court et à moyen termes du projet.

La solution PACGHT hybride répond mieux à ces objectifs que la solution PACG hybride de par ses coûts initiaux nettement plus faibles. De plus, les PACGHT présentent d'autres avantages qui leur permettent de se démarquer :

- Des travaux localisés dans la salle mécanique seulement, ce qui limite l'impact sur les occupants.
- Une portée des travaux réduite et pouvant être réalisée en dehors des vacances estivales scolaires de manière à bénéficier de meilleures conditions de marché et à simplifier le phasage des travaux.
- La préservation d'un système de chauffage existant dans un édifice patrimonial, évitant de causer des problèmes à l'enveloppe.
- La production d'ECD (60 °C).

Bref, l'objectif principal de cette étude était d'évaluer le potentiel d'une PACGHT pour décarboner les bâtiments existants équipés d'émetteurs de chaleur à haute température en climat froid. Cet objectif a été atteint. De manière plus spécifique, ce potentiel est confirmé pour une école primaire typique québécoise munie d'émetteurs de chaleur à haute température. Bien que cas précis ait été étudié, il est possible de généraliser les conclusions à tous les bâtiments présentant les caractéristiques suivantes :

- Le bâtiment est soumis à un climat froid similaire à celui de Montréal. Un climat plus froid pourrait même s'avérer encore plus propice à l'implantation d'une PACGHT.
- Le bâtiment est soumis au tarif M d'Hydro-Québec ou bien à une structure tarifaire équivalente facturant la puissance maximale appelée.
- Le bâtiment est localisé dans une région où les coûts de construction sont similaires à ceux considérés dans cette étude.
- Le bâtiment présente une consommation énergétique avec une forte dominance du chauffage des espaces.
- Le bâtiment est chauffé au gaz naturel.
- Le bâtiment est situé sur un site présentant des conditions hydrogéologiques favorables

et similaires à celles considérées dans cette étude.

Cela ouvre la porte à un vaste parc immobilier comprenant notamment les bâtiments institutionnels de toute sorte, les bâtiments multirésidentiels et les bâtiments commerciaux. Chaque projet devrait néanmoins faire l'objet d'une étude technico-économique spécifique.

Maintenant que le potentiel théorique des PACGHT a été étudié et confirmé, la réalisation d'un projet de démonstration intégrant ce concept novateur serait la prochaine étape. Cela permettrait de valider les résultats de cette étude et de tester cette technologie.

6.3 Comparaison avec la littérature

Cette section a pour objectif de comparer les résultats de ce mémoire avec d'autres études disponibles dans la littérature.

Tel que mentionné au chapitre 2, Bellos et al. [39] ont réalisé une étude comparable à celle-ci, mais pour une PACHT aérothermique. Le bâtiment existant, situé en Grèce, est chauffé par une chaudière au mazout qui alimente des radiateurs. La PACHT utilise du R1234ze, soit un réfrigérant A2L avec un PRG de 6. Le SCOP est de 2.0. Pour la présente étude, le scénario PACGHT présente un SCOP de 2.24. Il convient de mentionner que l'hiver est beaucoup moins rigoureux en Grèce qu'au Québec. En effet, on parle d'environ 1500 degrés-jours de chauffage (DJC) pour Thessaloniki alors que cette valeur est d'environ 3800 DJC pour Montréal [71]. Malgré cette différence de climat, il y a un gain à utiliser une source géothermique plutôt qu'aérothermique. La PACHT aérothermique étudiée présente d'ailleurs un COP de 1.5 pour une température ambiante de -8°C et une température au condenseur de 80°C . Cette PACHT ne pourrait probablement pas opérer à des températures ambiantes aussi froides que celles atteintes au Québec en hiver, ou du moins elle ne serait plus efficace. Les auteurs identifient d'ailleurs les énergies solaire et géothermique comme pistes de recherche future pour améliorer les performances du système.

L'étude de Dickinson et al. [43] a également été mentionnée au chapitre 2. Il s'agit de la seule étude trouvée dans la littérature qui se penche sur le couplage d'une PACHT avec une source géothermique. Un campus universitaire présentant une charge maximale de chauffage de 51 MW est analysé. Il est muni d'un réseau hydronique qui alimente des radiateurs avec un fluide à 95°C (retour à 75°C). L'échangeur géothermique est toutefois constitué de puits coaxiaux de 2000 m de profondeur de sorte que la température à l'entrée de l'évaporateur est de 30°C . Les conditions à l'évaporateur et au condenseur sont maintenues constantes durant toute la saison de chauffage. Le système est constitué de deux PAC en cascade. Le SCOP varie entre 2.74 (RE245CB2) et 3.07 (R1233zdE) pour les différents réfrigérants étudiés. Rappelons que

le SCOP de le scénario PACGHT dans notre étude est de 2.24, soit 27% plus faible. La température moyenne à la sortie du condenseur durant la saison de chauffage est d'environ 60 °C alors que la température moyenne à l'entrée de l'évaporateur est d'environ 5 °C. La PACGHT élève donc la température de la source de 55 °C en moyenne dans notre étude alors que cette valeur est de 65 °C (95 °C - 30 °C) dans l'étude de Dickinson et al. Il apparaît donc que ce système en cascade performe mieux que la PACGHT au R450A. De plus, le R1233zd appartient à la classe A1 tout comme le R450A. Ce réfrigérant et un système en cascade représentent donc des pistes de recherche future intéressantes. Il convient toutefois de mentionner qu'une boucle intermédiaire avec une pompe doit être ajoutée entre les deux PAC. De plus, davantage d'espace est requis pour installer deux PAC dans la salle mécanique ce qui n'est pas toujours possible dans le cadre d'un projet de rétrofit. Les séquences de contrôle sont également plus complexes que pour un système avec une seule PAC et plus d'équipements doivent être entretenus.

Une étude québécoise récente [36] sur les accumulateurs thermiques centralisés (ATC) a été présentée au chapitre 2. Des scénarios de décarbonation par rapport à une référence chauffée au gaz naturel y sont abordés. Trois types de bâtiments sont présentés : un bâtiment de bureaux, un bâtiment de commerces et une école primaire similaire à celle considérée pour ce mémoire. Les résultats pour l'école primaire démontrent que l'utilisation d'une chaudière électrique permet de réduire les GES de 84% [36], ce qui est cohérent avec les 86% obtenus dans ce mémoire. Le scénario chaudière électrique biénergie permet de décarboner à 65% alors que le même scénario avec du GNR permet de décarboner au même niveau que les scénarios TAÉ [36]. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans ce mémoire pour les scénarios PACGHT biénergie (65% de décarbonation) et PACGHT hybride GNR. Au niveau de la puissance maximale appelée, le scénario le plus performant utilisant des ATC permet d'atteindre une réduction de 21% par rapport à l'utilisation d'une chaudière électrique [36]. Dans ce mémoire, le scénario PACGHT hybride permet de réduire la puissance maximale appelée de 55% par rapport à l'utilisation d'une chaudière électrique pour un niveau de décarbonation de 87%. Tous les scénarios décarbonés dans l'étude de Vanroy et Kummert engendrent une augmentation de la facture énergétique par rapport à l'existant. Ce mémoire a démontré que certains scénarios décarbonés utilisant la géothermie pouvaient abaisser cette facture. Il est intéressant de constater que les auteurs suggèrent d'étudier le couplage entre un ATC et une PAC aérothermique ou géothermique.

6.4 Synthèse

Ce chapitre a évalué la performance globale de chaque scénario décarboné en combinant les résultats des analyses environnementale, énergétique et économique. Les scénarios géothermiques hybrides performant davantage que leurs homologues TAÉ. Le scénario PACGHT biénergie favorise la rentabilité au détriment de la réduction des GES. L'utilisation de GNR affecte de manière négligeable la performance globale du scénario PACGHT hybride en raison des faibles volumes de gaz consommés. Finalement, les deux scénarios les plus prometteurs pour décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température sont la PACG hybride et la PACGHT hybride. Le choix revient au propriétaire selon ses objectifs. Si la décarbonation la plus rentable est visée, l'implantation d'une PACGHT hybride est la solution qui se démarque. De plus, les considérations pratiques favorisant l'implantation d'une PACGHT ont été recensées. Il a été démontré que la portée des travaux se limite à la salle mécanique ce qui évite de perturber l'occupation et ce qui permet de réaliser des travaux hors des vacances estivales scolaires. Il a aussi été discuté que les PACGHT permettent de conserver des émetteurs de chaleur et des conditions d'opération qui ont fait leur preuve pour préserver l'enveloppe d'édifices patrimoniaux. Il est également possible de produire l'ECD.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

7.1 Synthèse des contributions

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer le potentiel en climat froid des pompes à chaleur géothermiques haute température (PACGHT) pour décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Pour y arriver, une étude de scénarios a été menée sur un prototype d'école primaire de 1640 m² situé à Montréal au Québec représentant le stock de bâtiments existants de cette typologie. Un modèle énergétique détaillé a été développé dans le logiciel TRNSYS. Ce dernier modélise les émetteurs de chaleur et leur capacité à chauffer les zones en fonction de la température du fluide qui leur est acheminé. Il intègre également la réponse thermique dynamique d'un échangeur géothermique constitué de puits à colonne permanente (PCP) via la convolution d'une fonction de transfert générée numériquement. Des cartes de performance d'une pompe à chaleur géothermique (PACG) et d'une PACGHT ont été construites à partir de données recueillies auprès de deux manufacturiers. Le coefficient de performance (COP) et la capacité en chauffage des pompes à chaleur sont donc modulés dans les simulations afin de reproduire des conditions réelles d'opération.

Les modèles numériques développés sont exploités afin d'établir les performances environnementale, énergétique et économique de plusieurs scénarios de décarbonation :

- Chaudière au gaz naturel. Scénario représentant le bâtiment existant (avant rétrofit). Le chauffage des espaces est assuré par des émetteurs de chaleur à haute température (82 °C).
- Chaudière électrique. La chaudière au gaz existante est remplacée par une chaudière électrique de capacité équivalente.
- PACG. La chaudière au gaz existante est remplacée par une PACG et des émetteurs de chaleur à basse température (50 °C) remplacent les émetteurs existants.
- PACG hybride. Scénario similaire au précédent à la différence que la PACG couvre partiellement les charges de chauffage et qu'une chaudière au gaz naturel assure l'appoint.
- PACGHT. La chaudière au gaz existante est remplacée par une PACGHT et les émetteurs de chaleur existants sont conservés.
- PACGHT hybride. Scénario similaire au précédent à la différence que la PACGHT couvre partiellement les charges de chauffage et qu'une chaudière au gaz naturel assure l'appoint.
- PACGHT hybride GNR. Scénario identique au précédent à la différence que du gaz na-

turel renouvelable (GNR, aussi appelé gaz de source renouvelable, GSR) est consommé plutôt que du gaz naturel fossile.

- PACGHT biénergie. Scénario similaire à PACGHT hybride à la différence que le chauffage d'appoint est géré selon la tarification biénergie d'Hydro-Québec.

Au niveau des performances environnementale et énergétique, les résultats démontrent qu'une simple substitution de la chaudière au gaz par une chaudière électrique suffit à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'école de près de 90%, soit le même niveau de décarbonation atteint par les scénarios géothermiques. La faible intensité carbone « cycle de vie » de l'électricité québécoise ($9.6 \text{ g}_{CO_2e}/MJ$) explique ce résultat. Cependant, l'emploi d'une chaudière électrique multiplie la puissance maximale appelée par plus de six fois par rapport à l'existant ce qui fait augmenter drastiquement la facture électrique et ce qui, à plus grande échelle, sursolliciterait le réseau d'Hydro-Québec.

Les scénarios géothermiques permettent de décarboner l'école tout en limitant l'augmentation de la puissance électrique maximale appelée. Les scénarios géothermiques hybrides sont plus efficaces que leurs homologues tout-à-l'électricité (TAÉ). Le système géothermique hybride couvre 60% de la charge maximale de chauffage, ce qui répond à environ 95% des besoins annuels de chauffage. Un chauffage d'appoint au gaz naturel vient combler les 5% restants par périodes hivernales de grand froid, ce qui limite la puissance maximale appelée tout en ayant un impact négligeable (3%) sur le niveau de décarbonation atteint. Le scénario PACG hybride présente la puissance maximale appelée la plus faible (80 kW). Le remplacement des émetteurs de chaleur par des unités basse température engendre un meilleur SCOP de la PACG hybride (3.53) en raison de températures moins chaudes au condenseur que pour la PACGHT hybride qui présente un SCOP de 2.27.

Le scénario PACGHT biénergie réduit les émissions de GES de 65% et présente une IÉ de $0.73 \text{ GJ}/\text{m}^2$ ce qui est plus élevé que tous les autres scénarios géothermiques étudiés. Le scénario PACGHT hybride GNR a un effet négligeable (2%) sur le niveau de décarbonation atteint par rapport à l'utilisation de gaz naturel fossile en raison des faibles volumes consommés.

Au niveau de la performance économique, le scénario PACGHT se démarque en diminuant l'investissement initial d'environ 200 000\$ par rapport au scénario PACG. Cela est principalement attribuable à la réutilisation des émetteurs de chaleur existants et au nombre réduit de PCP (3, plutôt que 4 pour le scénario PACG). Le même phénomène est observable entre les scénarios hybrides conventionnel et haute température. Le scénario PACGHT hybride présente une période de retour sur l'investissement (PRI) incluant les subventions de 6 années ce qui est beaucoup plus attrayant que le scénario PACG hybride qui présente une PRI

de 12 années. De leur côté, les scénarios PACG et PACGHT qui consomment exclusivement de l'électricité présentent une même PRI de 15 années.

L'analyse des valeurs actualisées nettes (VAN) après 25 ans d'opération confirme que les scénarios TAÉ sont moins rentables que les scénarios hybrides. Le scénario PACG hybride présente une VAN de 400 000\$, qui est la plus faible de tous les scénarios hybrides étudiés en plus de présenter une PRI doublée par rapport aux autres scénarios hybrides. Les scénarios PACGHT hybride au gaz naturel fossile et au GNR présentent des VAN respectives de 463 000\$ et de 449 000\$. L'utilisation du GNR n'affecte donc pas significativement la rentabilité économique dans ce cas précis étant donné que les volumes de gaz consommés par le chauffage d'appoint sont faibles.

Le scénario PACGHT biénergie sort gagnant en terme de rentabilité avec une VAN de 529 000\$. Le tarif biénergie est donc avantageux sur le plan économique, mais désavantageux sur le plan environnemental. En effet, rappelons qu'il décarbone significativement moins l'école (65%) par rapport aux autres scénarios à l'étude (90%). Ce tarif empêche l'utilisation du système géothermique en périodes hivernales de grand froid, soit précisément au moment où il se distingue des systèmes aérothermiques qui peinent à extraire de la chaleur de l'air ambiant. L'utilisation couplée de la biénergie et du GNR permet de retrouver un niveau de décarbonation similaire aux autres scénarios. Toutefois, la facture énergétique grimpe jusqu'à rendre ce scénario moins rentable que les scénarios PACGHT hybride ou PACGHT hybride GNR.

L'analyse économique a été réalisée en considérant un taux d'inflation sur l'énergie de 6%. La sensibilité des conclusions à ce paramètre a été évaluée pour des taux variant entre 3% et 10%. Les conclusions demeurent majoritairement inchangées bien que les VAN sur 25 ans de tous les scénarios augmentent avec l'inflation. L'augmentation des tarifs énergétiques augmentent la rentabilité de tous les scénarios géothermiques.

En raison de la grande variabilité des subventions dans le temps, l'analyse économique a été répétée sans aides financières. La conclusion est que la VAN sur 25 ans et la PRI de tous les scénarios sont hautement sensibles aux subventions. Les VAN sur 25 ans des scénarios géothermiques TAÉ deviennent même négatives. La PRI la plus courte passe à 12 ans pour le scénario PACGHT biénergie qui est maintenant favorisé. Les organismes subventionnaires ont un grand pouvoir sur l'implantation ou pas de mesures de décarbonation. À l'heure où la majorité des propriétaires de bâtiments pensent encore en dollars et où les cadres réglementaires nivellent par le bas, les subventions sont réellement la carotte au bout du bâton de la décarbonation. Elles sont ni plus ni moins le moteur de la lutte aux émissions de GES.

Ensuite, les considérations pratiques liées à l'implantation d'une PACGHT dans un bâtiment existant ont été étudiées :

- Des travaux localisés dans la salle mécanique, ce qui limite l'impact sur les occupants.
- Une portée des travaux réduite et pouvant être réalisée en dehors des vacances estivales scolaires de manière à bénéficier de meilleures conditions de marché et à simplifier le phasage des travaux.
- La préservation d'un système de chauffage existant dans un édifice patrimonial, évitant de causer des problèmes à l'enveloppe.
- La production d'eau chaude domestique (ECD) à une température d'au moins 60 °C.

À l'heure où les impacts des changements climatiques sont bien réels et où le déficit économique du Québec ne cesse de grandir, chaque projet de rétrofit de bâtiment devrait avoir deux objectifs : la décarbonation et la rentabilité. Dans cette optique, le potentiel des PACGHT comme approche de décarbonation des bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur haute température est confirmé. Ce projet a démontré que l'implantation d'une PACGHT hybride dans une école primaire typique du Québec engendre :

- Une réduction des émissions de GES de 87% par rapport à l'existant.
- Une réduction de l'IE de 41% par rapport à l'existant.
- Une réduction de la puissance maximale appelée de 55% par rapport à l'implantation d'une chaudière électrique.
- Une réduction de l'investissement initial de plus de 200 000\$ par rapport à l'implantation d'une PACG conventionnelle.
- Une PRI de 6 années par rapport à l'implantation d'une chaudière électrique.
- Une VAN de 463 000\$ par rapport à l'implantation d'une chaudière électrique.

7.2 Recommandations et perspectives

Cette étude a confirmé le potentiel des PACGHT pour décarboner les bâtiments existants munis d'émetteurs de chaleur à haute température. Ces bâtiments représentent une grande part des émissions de ce secteur au Québec. Les centres de services scolaires ont un parc immobilier particulièrement vieillissant ce qui en fait une solution de choix pour agir rapidement sur leur empreinte carbone et atteindre les cibles du plan pour une économie verte 2030 tout en assurant une saine utilisation de la puissance électrique maximale appelée [72].

Les PACGHT sont une solution émergente. De nombreuses avenues de recherche devraient être explorées afin de déployer cette solution de décarbonation à grande échelle et à son plein potentiel. Mentionnons notamment :

- La réalisation d'un projet de démonstration.

- L'étude d'autres types de bâtiments.
- L'intégration de la production d'ECD, notamment pour le multirésidentiel et les centres sportifs.
- L'ajout de la climatisation.
- Le couplage avec des puits en boucle fermée.
- La comparaison avec un système en cascade (PACG + PACHT).
- La comparaison avec d'autres réfrigérants (de classe A2L, par exemple).
- La comparaison avec l'aérothermie, notamment l'aérothermie haute température.
- La réalisation d'une analyse de cycle de vie afin de quantifier, entre autres, le carbone intrinsèque évité par la réutilisation des émetteurs de chaleur existants.
- L'intégration de pompage à débit variable sur toutes les boucles hydroniques, notamment sur la boucle d'eau souterraine.
- L'étude d'autres conditions hydrogéologiques affectant la performance et la rentabilité de l'échangeur géothermique.

Ce mémoire a également permis à l'auteur de formuler quelques recommandations pour les donneurs d'ouvrage et les consultants engagés dans la décarbonation des bâtiments.

Donneurs d'ouvrage :

- Les PACGHT représentent une nouvelle avenue pour décarboner les bâtiments existants en optimisant la puissance électrique maximale appelée et en minimisant l'impact sur les occupants et leurs activités.
- Les PACGHT représentent une solution équilibrée entre rentabilité et décarbonation.
- Les PACGHT représenteraient une avenue potentiellement intéressante pour décarboner les bâtiments patrimoniaux tout en évitant des problèmes d'enveloppe.
- Les PACGHT offrent le potentiel de chauffer et de climatiser les bâtiments.
- En milieu scolaire, les PACGHT permettent de réaliser des projets de retrofit en dehors des vacances estivales ce qui pourrait engendrer de meilleures conditions de marché durant les appels d'offres.

Consultants :

- Un système géothermique hybride avec appoint au gaz naturel permet d'augmenter la rentabilité des projets et de bénéficier d'une meilleure résilience énergétique.
- La chaudière au gaz naturel existante peut être utilisée en appoint à la PACGHT si elle est en bon état.
- Une PACGHT permet de produire de l'ECD ce qui pourrait être intéressant pour des bâtiments où ce poste de consommation énergétique est important (e.g. multirésidentiel et centres sportifs).
- L'intégration de pompage à débit variable sur toutes les boucles hydroniques et parti-

culièrement celle de l'eau souterraine permet de bonifier notablement la performance d'un système géothermique.

- Quelques modèles de PACT sont disponibles au Québec. Certains sont mêmes conçus et construits localement.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Faucher et M. Kummert, “Decarbonizing existing buildings using high-temperature ground-source heat pumps,” dans *Proceedings of Building Simulation 2025 : 19th Conference of IBPSA*. Brisbane, Australia : International Building Performance Simulation Association, 2025.
- [2] A. Levasseur *et al.*, “Improving the accuracy of electricity carbon footprint : Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions,” *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 136, 2021.
- [3] ASHRAE, “ASHRAE climatic design conditions 2009/2013/2017/2021,” <https://ashrae-meteo.info/v2.0/>, 2021.
- [4] J. Whitmore et P.-O. Pineau, “État de l’énergie au Québec 2025,” Chaire de gestion du secteur de l’énergie, HEC Montréal, Montreal, Canada, Rapport technique, févr. 2025.
- [5] S. J. Rees, *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, ser. Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. Elsevier Inc., 2016.
- [6] A. Nguyen, G. Beaudry et P. Pasquier, “Experimental assessment of a standing column well performance in cold climates,” *Energy and Buildings*, vol. 226, p. 110391, nov. 2020.
- [7] G. Beaudry *et al.*, “Standing column wells in cold climates : Lessons learned after one year of operating a demonstration system in Canada,” dans *Proceedings of the IGSHPA Research Track 2024*. Montreal, Canada : International Ground Source Heat Pump Association, 2024.
- [8] “Retrofits and conversions, not new buildings, needed for sustainable future, says expert,” *The Globe and Mail*, déc. 2023.
- [9] P. Simard, “Nouveautés dans le monde des pompes à chaleur,” Montréal, nov. 2023.
- [10] M. Lammle *et al.*, “Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings,” *Energy*, vol. 242, 2022.
- [11] L. Childs *et al.*, “Predicting the heat pump readiness of existing heating systems in the UK using diagnostic boiler data,” *Building Services Engineering Research & Technology*, janv. 2025.
- [12] C. Arpagaus *et al.*, “High temperature heat pumps : Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials,” *ENERGY*, vol. 152, p. 985–1010, juin 2018.

- [13] J. Jiang *et al.*, “A review and perspective on industry high-temperature heat pumps,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, 2022.
- [14] Hydro-Québec, “État d’avancement 2024 du plan d’approvisionnement 2023-2032,” 2024.
- [15] RNCAN-OEE, “Base de données complète sur la consommation d’énergie,” <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux>.
- [16] MERN, *Données de Consommation Des Bâtiments Institutionnels Québécois, Année 2016-2017*. Ministère de l’énergie et des ressources naturelles, gouvernement du Québec, 2021.
- [17] K. Vanroy, “Developing a Prototype Building Energy Model for a Quebec Primary School and Assessing the Importance of Detailed HVAC System Modeling,” Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, déc. 2022.
- [18] G. Strugala, M. Kummert et M. Kegel, “Empirical modelling of variable capacity air-to-air heat pumps in trnsys,” *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 15, n° 5, p. 616–633, sept. 2022.
- [19] A. Mustafa Omer, “Ground-source heat pumps systems and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n° 2, p. 344–371, févr. 2008.
- [20] L. Burté, “Etude des risques de colmatage et optimisation des procédés de traitement des doublets géothermiques superficiels,” Thèse de doctorat, Rennes 1, 2018.
- [21] C. Orio *et al.*, “A Survey of Standing Column Well Installations in North America,” *ASHRAE Transactions*, vol. 111, janv. 2005.
- [22] Z. O’Neill, J. D. Spitler et S. J. Rees, “Performance Analysis of Standing Column Well Ground Heat Exchanger Systems.” *ASHRAE transactions*, vol. 112, n° 2, p. 633–643, 2006.
- [23] P. Pasquier *et al.*, “Standing column wells,” dans *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, déc. 2016, p. 269–294.
- [24] L. Jacques et P. Pasquier, “Obtaining the hydraulic and thermal properties of the main hydrostratigraphic units surrounding a standing column well using a thermal response test,” *Journal of Hydrology*, vol. 623, p. 129823, 2023.
- [25] C. Rose *et al.*, “Approximation of short-term transfer functions for standing column well heat exchangers using wavelet decomposition and artificial neural networks,” mars 2025.
- [26] A. Nguyen, L. Jacques et P. Pasquier, “An easy-to-use analytical model for standing column wells operating with bleed,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 258, 2025.
- [27] L. Jacques *et al.*, “Development of a theoretical framework for simulating the thermal response of standing column wells operated with bleed,” 2025.

- [28] D. Marcotte et P. Pasquier, “Unit-response function for ground heat exchanger with parallel, series or mixed borehole arrangement,” *Renewable Energy*, vol. 68, p. 14–24, 2014.
- [29] —, “Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems,” *Geothermics*, vol. 37, n^o. 6, p. 651–665, déc. 2008.
- [30] G. Beaudry, P. Pasquier et A. Nguyen, “New formulations and experimental validation of non-stationary convolutions for the fast simulation of time-variant flowrates in ground heat exchangers,” *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 30, n^o. 3, p. 208–219, 2024.
- [31] G. Beaudry *et al.*, “Flow rate control in standing column wells : A flexible solution for reducing the energy use and peak power demand of the built environment,” *Applied Energy*, vol. 313, p. 118774, mai 2022.
- [32] F. Genest et R. Charneux, “Vers des thermopompes à haute température,” <https://www.voirvert.ca/nouvelles/innovation/vers-thermopompes-haute-temperature>.
- [33] “Heat pumps are hot, but commercial retrofits face cold realities | Utility Dive,” <https://www.facilitiesdive.com/news/commercial-heat-pump-retrofits-cold-costs/697325/>.
- [34] “Restauration de radiateurs,” <https://ecoradinc.com/fr/restauration-propretaire/>, 2025.
- [35] K. D’Avignon, “Stockage thermique et exemplarité de l’état :Résultats de l’étude, constats et recommandations,” École de technologie supérieure, Rapport Technique, 2022.
- [36] K. Vanroy et M. Kummert, “Potentiel des accumulateurs thermiques centralisés pour décarboner les bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec,” Polytechnique Montréal, Montréal, Rapport technique.
- [37] B. Zühlsdorf, “Annex 58 High-Temperature Heat Pumps 2 page summary,” International Energy Agency, Rapport technique, déc. 2024.
- [38] J. Yoo, C. E. Estrada-Perez et B.-H. Choi, “Investigation of heat pump technologies for high-temperature applications above 250 °C,” *Applied Energy*, vol. 384, 2025.
- [39] E. Bellos *et al.*, “Investigation of a High-Temperature Heat Pump for Heating Purposes,” *APPLIED SCIENCES-BASEL*, vol. 13, n^o. 4, p. 2072, févr. 2023.
- [40] “CSA B52 :23, Mechanical refrigeration code,” Toronto, ON.
- [41] “High Temperature Ground Source Heat Pumps | BEN | Balanced Energy Networks | Heat Sharing Networks,” <https://www.benuk.net/High-Temperature-Heat-Pumps.html>.

- [42] J. Barco-Burgos *et al.*, “Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks,” *Energy*, vol. 239, p. 122378, janv. 2022.
- [43] D. Dickinson *et al.*, “Thermal Performance of a Geothermal Source High-Temperature Heat Pump for District Heating – Comparison of Single-Stage and Cascade Vapor Compression Cycles,” dans *ASME 2023, IMECE 2023, October 29, 2023 - November 2, 2023*, vol. 7, New Orleans, LA, United states, 2023.
- [44] CanmetENERGY, “High-temperature heat pumps (HTHP) summary data (available products in Canada),” CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Varennes, QC, Rapport technique, 2023.
- [45] ECC Canada, “Canadian Weather Energy and Engineering Datasets (CWEEDS) and Canadian Weather Year for Energy Calculation (CWEC) - 2020 update,” Environment and Climate Change Canada, Toronto, ON, 2020.
- [46] S. Klein *et al.*, “TRNSYS 18 – A TRaNsient SYstem Simulation program,” University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 2024.
- [47] M. H. Sherman et D. Grimsrud, “Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data (Report LBL-10852),” Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, Rapport technique, 1980.
- [48] S. J. Emmerich et A. K. Persily, “Analysis of U.S. Commercial Building Envelope Air Leakage Database to Support Sustainable Building Design,” *International Journal of Ventilation*, vol. 12, n^o. 4, p. 331–344, mars 2014.
- [49] ASHRAE, *Standard 62.1-2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
- [50] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, “ANSI/ASHRAE/IE Standard 90.1-2019, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings,” Atlanta, GA, Rapport technique, 2019.
- [51] “Oilon Selection Tool,” Oilon Group, Lahti, 2025.
- [52] G. Tonellato *et al.*, “A model-based continuous commissioning method for an efficient integration of ground source heat pumps in the building ecosystem,” *Energy and Buildings*, vol. 333, p. 115492, 2025.
- [53] G. Dion, P. Pasquier et D. Marcotte, “Deconvolution of experimental thermal response test data to recover short-term g-function,” *Geothermics*, vol. 100, 2022.
- [54] P. Eskilson, *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Lund : Grahns Boktryckeri AB, 1987.

- [55] S. Robert, P. Pasquier et A. Nguyen, “Impact of layered heterogeneity on thermal response test interpretation performed on a standing column well operated without bleed,” *Geothermics*, vol. 101, p. 102353, mai 2022.
- [56] “MATLAB,” The MathWorks, Inc., 2021.
- [57] “CSA C448 Series-16 : Design and installation of ground source heat pump systems for commercial and residential buildings,” 2016.
- [58] “Norbert Selection System,” Multistack, 2024.
- [59] TESS, “TESSLibs 18 - Component libraries for the TRNSYS simulation environment,” Thermal Energy Systems Specialists, Madison, WI, 2024.
- [60] MERN, “Facteurs de conversion et d’émissions utilisés pour le bilan du secteur institutionnel,” 2022.
- [61] D. des services législatifs, “Lois codifiées, Règlement sur les combustibles propres,” <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2022-140/page-18.html#h-1349785>, sept. 2024.
- [62] Énergir, “R-4008-2017-B-0945. Énergir—Demande concernant la mise en place de mesures relatives à l’achat et la vente de gaz naturel renouvelable. Gaz Métro—12, Document 1, Preuve relative à l’étape 1,” 2023.
- [63] “Outil de calcul OSE (Outil Solutions efficaces),” Hydro-Québec, 2024.
- [64] “Règles budgétaires d’investissement pour les années scolaires 2024-2025 à 2026-2027,” 2024.
- [65] “Aide financière pour un projet d’implantation standard de mesures d’efficacité énergétique ou de conversion énergétique,” <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/reussir-ses-projets-transition-energetique/aide-financiere/programme-ecoperformance/projet-implantation-standard>, 2025.
- [66] “Conversion d’un chauffage au gaz naturel à la biénergie – Programme ÉcoPerformance,” <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/reussir-ses-projets-transition-energetique/aide-financiere/programme-ecoperformance/conversion-chauffage-gaz-bienergie#c311206>, 2025.
- [67] Hydro-Québec, *Tarifs d’électricité En Vigueur Le 1er Avril 2024*. Montréal, QC : Hydro-Québec, 2024.
- [68] Énergir, *Conditions de Service et Tarifs En Vigueur Le 1er Décembre 2024*. Montréal, QC : Énergir, 2024.

- [69] J. Ouellette, M. Dorais et V. de Tilly, “Facture d’électricité : Un choc tarifaire imminent ?” Union des consommateurs, Rapport technique, 2024.
- [70] “Climate Change and Children’s Health and Well-Being in the United States,” U.S. Environmental Protection Agency, Rapport technique, 2023.
- [71] “Heating & Cooling Degree Days – Free Worldwide Data Calculation,” <https://www.degree-days.net/#>.
- [72] Québec, *Plan Pour Une Économie Verte 2030. Politique-cadre Pour d’électrification et de Lutte Contre Les Changements Climatiques*. Québec, QC : Gouvernement du Québec, 2020.

ANNEXE A DÉTAIL DES INVESTISSEMENTS INITIAUX

Cette annexe fournit le détail de l'investissement initial requis pour implanter chaque scénario décarboné. Il y a un tableau par scénario. Dans la colonne « item », la mention (F) indique que le prix unitaire est pour la fourniture seulement. La mention (I) indique que le prix unitaire est pour l'installation seulement. La mention (FI) indique que le prix unitaire est pour la fourniture et l'installation.

CHAUDIÈRE ÉLECTRIQUE

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Chaudière électrique	200	kWth chauffage design	160,49 \$	32 098,77 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	1	forfaitaire	30 000,00 \$	30 000,00 \$
Condenseur aérothermique pour climatisation (F)	50	tonne	2 000,00 \$	100 836,57 \$
Tuyauterie salle mécanique (F)	1	forfaitaire	5 000,00 \$	5 000,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	5 000,00 \$	5 000,00 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	5 000,00 \$	5 000,00 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	5 000,00 \$	5 000,00 \$
Plombier (I)	80	heure	100,00 \$	8 000,00 \$
Installation aérothermie (I)	1	forfaitaire	50 000,00 \$	50 000,00 \$
				- \$
Sous-total				240 935,34 \$
Taxes				36 080,07 \$
Total avant subventions				277 015,40 \$

PACG

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Multistack R454B (F)	200	kWth chauffage design	1 257,05 \$	251 410,53 \$
Remplacement radiateurs (FI)	1	forfaitaire	200 000,00 \$	200 000,00 \$
Remplacement serpentin chauffage	1	unité	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	0	forfaitaire	30 000,00 \$	- \$
Forage PCP de 135 m (FI)	4	puits	30 000,00 \$	120 000,00 \$
Forage PI de 135 m (FI)	1	puits	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Tuyauterie salle mécanique et entrée géothermie (F)	1	forfaitaire	24 600,00 \$	24 600,00 \$
Système de pressurisation du glycol (F)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Pompe P-HOT (F)	2,36	HP	950,00 \$	2 242,00 \$
Pompe P-COLD (F)	2,09	HP	950,00 \$	1 985,50 \$
Pompe P-GEO (F)	2,09	HP	950,00 \$	1 985,50 \$
Échangeur à plaques en redondance (F)	200	kW	48,39 \$	9 677,09 \$
Filtre eau souterraine (F)	200	USGPM	78,75 \$	15 750,00 \$
Tuyauterie horizontale, isolant et connexions (FI)	5	puits	4 537,00 \$	22 685,00 \$
Tranchées / excavation (FI)	5	puits	4 542,00 \$	22 710,00 \$
Aménagement tête de puits (FI)	5	puits	2 600,00 \$	13 000,00 \$
Pompe P-SUB (FI)	4	unité	2 840,00 \$	11 360,00 \$
Frais généraux foreur (FI)	5	puits	3 591,00 \$	17 955,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	24 490,67 \$	24 490,67 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	83 741,52 \$	83 741,52 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	23 900,00 \$	23 900,00 \$
Plombier (I)	320	heure	100,00 \$	32 000,00 \$
				- \$
				- \$
Sous-total				909 492,81 \$
Taxes				136 196,55 \$
Total avant subventions				1 045 689,35 \$

PACG HYBRIDE

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Multistack R454B (F)	120	kWth chauffage design	1 257,05 \$	150 846,32 \$
Remplacement radiateurs (FI)	1	forfaitaire	200 000,00 \$	200 000,00 \$
Remplacement serpentin chauffage	1	unité	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	0	forfaitaire	30 000,00 \$	- \$
Forage PCP de 135 m (FI)	3	puits	30 000,00 \$	90 000,00 \$
Forage PI de 135 m (FI)	1	puits	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Tuyauterie salle mécanique et entrée géothermie (F)	1	forfaitaire	24 600,00 \$	24 600,00 \$
Système de pressurisation du glycol (F)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Pompe P-HOT (F)	2,36	HP	950,00 \$	2 242,00 \$
Pompe P-COLD (F)	1,29	HP	950,00 \$	1 225,50 \$
Pompe P-GEO (F)	1,29	HP	950,00 \$	1 225,50 \$
Échangeur à plaques en redondance (F)	160	kW	48,39 \$	7 741,67 \$
Filtre eau souterraine (F)	150	USGPM	78,75 \$	11 812,50 \$
Tuyauterie horizontale, isolant et connexions (FI)	4	puits	4 537,00 \$	18 148,00 \$
Tranchées / excavation (FI)	4	puits	4 542,00 \$	18 168,00 \$
Aménagement tête de puits (FI)	4	puits	2 600,00 \$	10 400,00 \$
Pompe P-SUB (FI)	3	unité	2 840,00 \$	8 520,00 \$
Frais généraux foreur (FI)	4	puits	3 591,00 \$	14 364,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	24 490,67 \$	24 490,67 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	83 741,52 \$	83 741,52 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	23 900,00 \$	23 900,00 \$
Plombier (I)	320	heure	100,00 \$	32 000,00 \$
				- \$
				- \$
Sous-total				753 425,68 \$
Taxes				112 825,50 \$
Total avant subventions				866 251,17 \$

PACGHT

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Oilon P220 R450A avec subcooler (F)	200	kWth chauffage design	1 584,51 \$	316 901,41 \$
Transformateur 600 V à 480 V (F)	1	unité	11 650,00 \$	11 650,00 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	0	forfaitaire	30 000,00 \$	- \$
Forage PCP de 135 m (FI)	3	puits	30 000,00 \$	90 000,00 \$
Forage PI de 135 m (FI)	1	puits	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Tuyauterie salle mécanique et entrée géothermie (F)	1	forfaitaire	24 600,00 \$	24 600,00 \$
Système de pressurisation du glycol (F)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Pompe P-HOT (F)	1,6	HP	950,00 \$	1 520,00 \$
Pompe P-COLD (F)	1,8	HP	950,00 \$	1 710,00 \$
Pompe P-GEO (F)	1,8	HP	950,00 \$	1 710,00 \$
Échangeur à plaques en redondance (F)	200	kW	48,39 \$	9 677,09 \$
Filtre eau souterraine (F)	150	USGPM	78,75 \$	11 812,50 \$
Tuyauterie horizontale, isolant et connexions (FI)	4	puits	4 537,00 \$	18 148,00 \$
Tranchées / excavation (FI)	4	puits	4 542,00 \$	18 168,00 \$
Aménagement tête de puits (FI)	4	puits	2 600,00 \$	10 400,00 \$
Pompe P-SUB (FI)	3	unité	2 840,00 \$	8 520,00 \$
Frais généraux foreur (FI)	4	puits	3 591,00 \$	14 364,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	24 490,67 \$	24 490,67 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	83 741,52 \$	83 741,52 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	23 900,00 \$	23 900,00 \$
Plombier (I)	320	heure	100,00 \$	32 000,00 \$
				- \$
				- \$
Sous-total				723 313,19 \$
Taxes				108 316,15 \$
Total avant subventions				831 629,34 \$

PACGHT HYBRIDE OU PACGHT HYBRIDE GNR

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Oilon P220 R450A avec subcooler (F)	120	kWth chauffage design	1 584,51 \$	190 140,85 \$
Transformateur 600 V à 480 V (F)	1	unité	11 650,00 \$	11 650,00 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	0	forfaitaire	30 000,00 \$	- \$
Forage PCP de 135 m (FI)	2	puits	30 000,00 \$	60 000,00 \$
Forage PI de 135 m (FI)	1	puits	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Tuyauterie salle mécanique et entrée géotherm	1	forfaitaire	24 600,00 \$	24 600,00 \$
Système de pressurisation du glycol (F)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Pompe P-HOT (F)	1,6	HP	950,00 \$	1 520,00 \$
Pompe P-COLD (F)	1,21	HP	950,00 \$	1 149,50 \$
Pompe P-GEO (F)	1,21	HP	950,00 \$	1 149,50 \$
Échangeur à plaques en redondance (F)	160	kW	48,39 \$	7 741,67 \$
Filtre eau souterraine (F)	100	USGPM	78,75 \$	7 875,00 \$
Tuyauterie horizontale, isolant et connexions	3	puits	4 537,00 \$	13 611,00 \$
Tranchées / excavation (FI)	3	puits	4 542,00 \$	13 626,00 \$
Aménagement tête de puits (FI)	3	puits	2 600,00 \$	7 800,00 \$
Pompe P-SUB (FI)	2	unité	2 840,00 \$	5 680,00 \$
Frais généraux foreur (FI)	3	puits	3 591,00 \$	10 773,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	24 490,67 \$	24 490,67 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	83 741,52 \$	83 741,52 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	23 900,00 \$	23 900,00 \$
Plombier (I)	320	heure	100,00 \$	32 000,00 \$
				- \$
				- \$
				- \$
				- \$
Sous-total				541 448,71 \$
Taxes				81 081,94 \$
Total avant subventions				622 530,65 \$

PACGHT BIÉNERGIE

Item	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix
Oilon P220 R450A avec subcooler (F)	120	kWth chauffage design	1 584,51 \$	190 140,85 \$
Transformateur 600 V à 480 V (F)	1	unité	11 650,00 \$	11 650,00 \$
Entrée électrique 400 A à 600 V (FI)	0	forfaitaire	30 000,00 \$	- \$
Forage PCP de 135 m (FI)	2	puits	30 000,00 \$	60 000,00 \$
Forage PI de 135 m (FI)	1	puits	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Tuyauterie salle mécanique et entrée géothermie (F)	1	forfaitaire	24 600,00 \$	24 600,00 \$
Système de pressurisation du glycol (F)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
Pompe P-HOT (F)	1,6	HP	950,00 \$	1 520,00 \$
Pompe P-COLD (F)	1,21	HP	950,00 \$	1 149,50 \$
Pompe P-GEO (F)	1,21	HP	950,00 \$	1 149,50 \$
Échangeur à plaques en redondance (F)	160	kW	48,39 \$	7 741,67 \$
Filtre eau souterraine (F)	100	USGPM	78,75 \$	7 875,00 \$
Tuyauterie horizontale, isolant et connexions (FI)	3	puits	4 537,00 \$	13 611,00 \$
Tranchées / excavation (FI)	3	puits	4 542,00 \$	13 626,00 \$
Aménagement tête de puits (FI)	3	puits	2 600,00 \$	7 800,00 \$
Pompe P-SUB (FI)	2	unité	2 840,00 \$	5 680,00 \$
Frais généraux foreur (FI)	3	puits	3 591,00 \$	10 773,00 \$
Calorifugeage (FI)	1	forfaitaire	24 490,67 \$	24 490,67 \$
Contrôle (FI)	1	forfaitaire	83 741,52 \$	83 741,52 \$
Électricité (FI)	1	forfaitaire	23 900,00 \$	23 900,00 \$
Plombier (I)	320	heure	100,00 \$	32 000,00 \$
2e compteur électrique pour bi-énergie (FI)	1	forfaitaire	10 000,00 \$	10 000,00 \$
				- \$
Sous-total				551 448,71 \$
Taxes				82 579,44 \$
Total avant subventions				634 028,15 \$