

Couplage d'un accumulateur thermique électrique central et de la géothermie: potentiel dans les écoles primaires au Québec

par

Wiem MOOTAMRI

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 26 AOÛT 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Wiem Mootamri, 2026



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Katherine D'Avignon, directrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Philippe Terrier, président du jury
Département des enseignements généraux à l'École de technologie supérieure

M. Kun Zhang, examinateur interne
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. François Laurencelle, examinateur externe
Hydro-Québec

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

LE 29 JUILLET 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire de maîtrise, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements ont été précieux tout au long de ce parcours.

Je souhaite tout d'abord adresser mes sincères remerciements à ma directrice de recherche, Prof. Katherine D'Avignon, pour son encadrement, sa disponibilité et son soutien qui ont été déterminants dans l'aboutissement de ce mémoire. J'ai particulièrement apprécié la qualité de nos échanges qui m'ont permis de développer ma réflexion et de progresser tant sur le plan scientifique que personnel.

Je remercie également M. François Laurencelle pour son expertise, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont contribué à enrichir cette recherche et à surmonter les défis rencontrés au cours de la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier mes collègues du ltsb et mes amis pour leurs encouragements, leurs échanges constructifs et leur soutien moral tout au long de ce parcours.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants toujours présents même à distance.

Potentiel du couplage d'accumulateur thermique électrique central avec la géothermie dans les écoles primaires au Québec

Wiem MOOTAMRI

RÉSUMÉ

Le secteur des bâtiments au Québec constitue l'un des principaux postes de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ce qui en fait un levier essentiel pour atteindre les objectifs de réduction des émissions fixés à l'horizon 2030. Dans ce contexte, les écoles primaires occupent une place importante en raison de leur nombre et de leur devoir d'exemplarité ; elles se doivent de décarboner leur chauffage.

Le présent projet de recherche s'inscrit dans cette problématique et explore une solution hybride novatrice mise en œuvre dans sept écoles primaires au Québec : la combinaison de la géothermie par puits verticaux et d'un accumulateur thermique électrique centralisé (ATC) comme système de chauffage auxiliaire. En effet, le déséquilibre entre la chaleur injectée dans le sol et celle qui en est retirée peut entraîner une dérive progressive de la température du sol au fil des années. Pour limiter ce phénomène en climat froid, on sous-dimensionne le champ de puits géothermiques par rapport aux besoins de chauffage et on assure le reste de la demande par une source auxiliaire, typiquement une chaudière électrique ou à combustible. L'objectif du couplage d'un ATC à la géothermie est donc de desservir les besoins de chauffage de manière durable ; il vise à maintenir la température du sol dans le temps, tout en réduisant les appels de puissance lors des périodes de pointe, sans recourir aux combustibles fossiles. Bien qu'opérant depuis quelques années dans sept écoles primaires québécoises, la performance réelle du couplage reste à ce jour théorique, n'ayant jamais fait l'objet d'une étude.

Afin d'évaluer la performance de ce couplage, un archétype de bâtiment scolaire est développé et simulé à l'aide du logiciel EnergyPlus. Les caractéristiques géométriques et les configurations des systèmes CVCA de chacune des sept écoles ont été extraites et analysées afin de développer le modèle archétype. Cette modélisation permet d'analyser le comportement énergétique du système couplé dans différents scénarios d'exploitation, en tenant compte des conditions climatiques québécoises et des profils de demande des bâtiments scolaires. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à des données énergétiques réelles afin d'assurer la validité des simulations.

L'étude permet de démontrer la performance du système. Le couplage permet une réduction des coûts énergétiques de 1 116 \$/saison hivernale, et une diminution moyenne des pointes d'appel de puissance électrique pouvant atteindre 30 kW (17 kW en moyenne) vis-à-vis d'une chaudière électrique qui serait utilisée comme auxiliaire. À terme, cette recherche contribue à l'optimisation énergétique du parc scolaire québécois et s'inscrit dans une démarche plus large de transition vers des systèmes de chauffage durables et à faibles émissions de carbone.

Mots-clés : Transition énergétique, Bâtiments institutionnels, Stockage thermique, Géothermie, Modélisation énergétique.

Evaluating the potential of electric thermal storage as an auxiliary to ground coupled heat pump system in elementary schools in Québec

Wiem MOOTAMRI

ABSTRACT

The building sector in Quebec is one of the largest consumers of energy and a major source of greenhouse gas (GHG) emissions, making it a key area for achieving the province's 2030 emission reduction targets. In this context, elementary schools represent an important opportunity because of their large number and their responsibility to lead by example in decarbonizing their heating systems.

This research project addresses this challenge by investigating an innovative hybrid heating solution implemented in seven elementary schools in Quebec: the integration of vertical ground source heat pump (GSHP) systems with a centralized Electric Thermal Storage (ETS) unit as an auxiliary heating equipment. An imbalance between the heat injected into the ground and the heat extracted from it can lead to a gradual long-term drift in ground temperature. To mitigate this effect in cold climates, geothermal bore fields are intentionally undersized relative to the building heating demand, while the remaining load is supplied by an auxiliary heat source. The objective of coupling an ETS system with geothermal energy is, therefore, to provide sustainable heating by maintaining long-term ground temperature stability while reducing peak electrical demand without relying on fossil fuels. Although this hybrid system has been operating in seven Quebec elementary schools for several years, its actual performance has remained theoretical and has never been comprehensively evaluated.

To assess the performance of this hybrid system, an archetype school building was developed and simulated using EnergyPlus. The geometric characteristics and HVAC system configurations of each of the seven schools were collected and analyzed to develop the archetype model. This modelling approach makes it possible to evaluate the energy performance of the coupled system under various operating scenarios while accounting for Quebec's climatic conditions and the heating demand profiles of school buildings. The simulation results were subsequently compared with measured energy consumption data to verify the model.

The study demonstrates the effectiveness of the hybrid system. Replacing an electric boiler with an ETS unit as the auxiliary heating system results in energy cost savings of 1 116 \$/winter season and reduces peak electrical demand by up to 30 kW (17 kW on average). Ultimately, this research contributes to improving the energy performance of Quebec's school building stock and supports the broader transition toward sustainable, low-carbon heating systems.

Keywords: Energy transition, Institutional buildings, Thermal energy storage, Geothermal energy, Energy modelling.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Revue de littérature	9
1.1 Introduction au parc scolaire québécois.....	9
1.2 Modèles archétypes dans la littérature	11
1.2.1 Définition des caractéristiques d'un modèle archétype.....	13
1.2.2 Modèles archétypes du parc scolaire québécois.....	17
1.3 Partition des locaux du parc scolaire québécois	23
1.4 Modélisation des systèmes géothermiques dans EnergyPlus	26
1.4.1 Modèles de température du sol no perturbé	27
1.4.2 Modèles de calcul de la réponse thermique du sol (<i>g-function</i>).....	29
1.4.3 Modèle de thermopompe air-eau.....	30
1.5 Rôle du stockage thermique dans un système de PACG	33
1.6 Vérification des modèle archétypes du parc scolaire québécois.....	36
CHAPITRE 2 Méthodologie globale.....	39
2.1 Développement du modèle archétype	39
2.2 Comparaison de la performance du couplage ATC-géothermie aux scénarios simulé.....	40
CHAPITRE 3 Développement du modèle archétype	41
3.1 Écoles de référence	42
3.2 Géométrie du modèle archétype	43
3.3 Ensemble de construction	48
3.4 Horaires et densités	49
3.5 Air neuf et évacuation.....	52
3.6 Eau chaude sanitaire	52
3.7 Système CVCA.....	53
3.7.1 Système CVCA dans les écoles de références	53
3.7.2 École S1*.....	54
3.7.3 École S2*.....	55

3.7.4	École S3*.....	56
3.7.5	École S4.....	57
3.7.6	École S5.....	57
3.7.7	École S6.....	58
3.7.8	École S7.....	59
3.7.9	Système CVCA dans le modèle archétype.....	61
CHAPITRE 4 Potential of electric thermal storage as auxiliary to ground coupled heat pump system.....		63
4.1	Abstract.....	63
4.2	Introduction.....	63
4.3	Global methodology.....	64
4.4	Reference school buildings.....	65
4.5	Archetype description	66
4.5.1	HVAC system	67
4.5.2	Ground loop heat exchanger	68
4.6	Adjustment of model schedules	71
4.7	Tested cases	74
4.7.1	Scenarios with auxiliary heating	74
4.7.2	ETS model.....	75
4.8	Results and discussion	78
4.8.1	Impact of ETS on power profile.....	78
4.8.2	Impact of ETS on electric bill	79
4.9	Conclusion	81
4.10	Acknowledgment	82
CHAPITRE 5 Discussion		83
5.1	Vérification du modèle archétype.....	83
5.2	Principaux résultats.....	91
5.2.1	Dépassement de la puissance de nivelage	93
5.2.2	Surdimensionnement de l'ATC.....	94
5.3	Limitations et perspectives	95

CONCLUSION.....	99
ANNEXE I Coefficients générés pour la modélisation des PACG dans EnergyPlus	101
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques répertoriées des différents archétypes.....16
Tableau 1.2	Archétype Québec pour les établissements scolaires22
Tableau 1.3	Partition des espaces des écoles primaires selon différentes sources25
Tableau 3.1	Caractéristiques géométriques des 7 écoles de référence42
Tableau 3.2	Caractéristiques des gymnases dans 11 écoles du Québec.....44
Tableau 3.3	Pourcentage des espaces occupés dans l’archétype et ceux des espaces occupés dans les écoles primaires47
Tableau 3.4	Matériaux de l’ensemble de construction utilisé dans le modèle archétype et leur valeur RSI.....49
Tableau 3.5	Propriétés de la fenestration utilisée dans le modèle archétype49
Tableau 3.6	Horaires proposés par le CNEB 2011 modifié Québec pour les écoles et les universités.....50
Tableau 3.7	Densités proposées dans le CNEB 2011 modifié Québec pour les écoles primaires.51
Tableau 3.8	Taux de ventilation dans la zone respiratoire selon l’ASHRAE 62.1 2022 52
Tableau 3.9	Taux d’évacuation l’ASHRAE 62.1 202252
Tableau 3.10	Caractéristiques des systèmes de chauffage des 7 écoles de référence60
Tableau 4.1	Characteristics of reference schools65
Tableau 4.2	Soil properties.....69
Tableau 4.3	Borehole characteristics.....70
Tableau 4.4	Confirming model accuracy using annual and monthly data74
Tableau 4.5	Monthly peak power over the winter season76
Tableau 4.6	Electric bill of the three tested cases80

Tableau 5.1	Pointe électrique mensuelle pendant une saison hivernale.....	93
Tableau 5.2	Facture électrique pour une saison hivernale	93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	Géométrie du modèle archétype43
Figure 3.2	Comparaison entre la superficie des gymnases et l'année de construction, la superficie totale, et le nombre d'élèves45
Figure 3.3	Coefficient de corrélation de Pearson pour la superficie du gymnase en fonction de l'année de construction, la superficie totale, et le nombre d'élèves46
Figure 3.4	Organisation spatiale du rez-de-chaussée de l'archétype48
Figure 3.5	Organisation spatiale du 1 ^e étage de l'archétype48
Figure 3.6	Boucle d'eau chaude sanitaire dans le modèle archétype53
Figure 3.7	Schéma simplifié du système de chauffage répertorié dans les 7 écoles de références.....54
Figure 3.8	Schéma du système de chauffage de l'école S1*55
Figure 3.9	Schéma du système de chauffage de l'école S2*56
Figure 3.10	Schémas du système de chauffage de l'école S3*56
Figure 3.11	Schéma du système de chauffage de l'école S457
Figure 3.12	Schéma du système de chauffage de l'école S558
Figure 3.13	Schéma du système de chauffage de l'école S6.....59
Figure 3.14	Schéma du système de chauffage de l'école S760
Figure 3.15	Schémas simplifiés de système de CVCA dans l'archétype62
Figure 4.1	Archetype model's geometry.....67
Figure 4.2	HVAC system of the baseline model68
Figure 4.3	Baseline model before and after calibration72
Figure 4.4	Sectional view of the ETS device.....76

Figure 4.5	Brick charging strategy of the ETS	77
Figure 4.6	Heating loop thermal needs from an auxiliary	78
Figure 4.7a	Electric power profile in the 3 cases.....	79
Figure 5.1	Comparaison du profil d'intensité énergétique mensuelle	84
Figure 5.2	Comparaison du profil de puissance maximale normalisée	85
Figure 5.3	Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S1*	86
Figure 5.4	Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S2*	87
Figure 5.5	Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S3*	87
Figure 5.6	Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'archétype	88
Figure 5.7	Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S1*	89
Figure 5.8	Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S2*	90
Figure 5.9	Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S3*	90
Figure 5.10	Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'archétype.....	91
Figure 5.11	Température d'alimentation des PAC pour les scénarios A_{Geo} et A_{ATC}	94

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Adm	Administration
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ATC	Accumulateur thermique central
Biblio	Bibliothèque
CNEB	Code National de l'Énergie pour les Bâtiments
CSS	Centre de services scolaire
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
Élec	Électrique
GES	Gaz à effet de serre
Gym	Gymnase
IÉ	Intensité énergétique
Méc	Mécanique
MEQ	Ministère de l'Éducation
PACA	Pompes à chaleur à air
PACG	Pompes à chaleur géothermique
RC	Relative Compacity (Compacité relative)
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient (coefficient de gain de chaleur solaire)
TP	Thermopompe
WWR	Window-to-Wall Ratio (rapport entre l'aire totale du fenêtrage vertical et des portes et l'aire brute des murs extérieurs)

INTRODUCTION

0.1 Contexte et problématique

Dans le cadre de ses objectifs climatiques, le Québec doit faire preuve d'exemplarité en matière de décarbonation de ses propres infrastructures. À cet effet, le gouvernement s'est engagé à réduire de 60 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à son parc immobilier d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990 (Gouvernement du Québec, 2026). En outre, il a annoncé en 2021 son intention de rendre l'ensemble du parc de bâtiments institutionnels carboneutre d'ici 2040 (Gouvernement du Québec, 2026). Parmi ces infrastructures figurent les bâtiments scolaires gérés par les centres de services scolaires (CSS). Avec 2308 écoles primaires réparties entre 60 centres de services scolaires francophones et 9 commissions scolaires anglophones (Consortium de recherche Schola, 2022), le parc immobilier scolaire québécois constitue un levier majeur pour l'atteinte de ces cibles de réduction des émissions.

La substitution des combustibles fossiles par l'électricité représente une stratégie clé de réduction des émissions de GES. Cette transition est favorisée par un réseau électrique dont la production repose à plus de 99% sur des ressources renouvelables, principalement l'hydroélectricité (Hydro-Québec, 2026a), ainsi que par des tarifs d'électricité historiquement parmi les plus bas en Amérique du Nord en raison de l'abondance des ressources hydroélectriques québécoises (Hydro-Québec, 2025a). Cependant, la volonté d'électrifier massivement ces infrastructures pose un défi de gestion de la demande électrique. En effet, lors des périodes de froid hivernales, la demande simultanée surcharge le réseau électrique québécois forçant Hydro-Québec à l'importation d'électricité provenant des réseaux voisins (Hydro-Québec, 2026c).

Afin de répondre à la croissance de la demande électrique engendrée par la décarbonation des bâtiments, Hydro-Québec a élaboré un *Plan d'approvisionnement* (Hydro-Québec, 2022) qui présente les besoins prévus en énergie et en puissance pour les dix prochaines années ainsi que les moyens envisagés pour y répondre. En complément, son *Plan d'action 2035* (Hydro-Québec, 2023) mise sur une approche intégrée qui ne repose pas uniquement sur l'ajout de

nouvelles capacités de production ou sur les importations d'électricité. Cette stratégie s'appuie également sur l'efficacité énergétique et la gestion de la demande de puissance lors des périodes de pointe hivernale. Le volet efficacité énergétique vise notamment l'optimisation des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA), l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments et le déploiement d'équipements plus performants, tels que les thermopompes. Quant à la gestion de la puissance, elle repose sur différentes mesures de flexibilité énergétique permettant de réduire ou de déplacer la consommation lors des périodes critiques grâce, entre autres, au stockage thermique.

Cet enjeu de gestion des pointes de demande ne touche pas uniquement l'État et le gestionnaire de réseau, mais également les opérateurs de bâtiments institutionnels. En effet, les coûts associés au maintien et au développement des infrastructures du réseau électrique nécessaires pour répondre aux pointes de puissance se répercutent ultimement sur les tarifs d'électricité. Ainsi, les bâtiments institutionnels, assujettis à certains tarifs d'Hydro-Québec comme le Tarif M, sont facturés non seulement en fonction de l'énergie consommée, mais également en fonction de la puissance maximale appelée au cours d'une période de facturation. Les frais liés à la puissance représentent alors une part importante de la facture d'électricité. De plus, la puissance maximale appelée en période hivernale peut influencer la puissance minimale à facturer au cours du reste de l'année, augmentant ainsi les coûts même lorsque la demande réelle diminue. Hydro-Québec propose également des options de gestion de la demande de puissance (GDP) destinées aux clients d'affaires, y compris ceux assujettis au Tarif M. Ces programmes offrent des incitatifs financiers aux organisations qui réduisent leur appel de puissance lors des événements de pointe hivernaux (Hydro-Québec, 2026b). Bien qu'ils visent principalement à accroître la flexibilité du réseau et à limiter les investissements dans de nouvelles infrastructures, ces programmes démontrent également l'intérêt économique de la gestion de la puissance pour les exploitants de bâtiments institutionnels. Dans ce contexte, les gestionnaires de bâtiments ont intérêt à mettre en œuvre des stratégies visant à réduire à la fois leur consommation énergétique et leur appel de puissance maximal, notamment lors des périodes de pointe hivernale.

Le chauffage constitue le principal poste de consommation énergétique dans le secteur commercial et institutionnel, représentant 41 % de l'énergie totale utilisée (Whitmore & Pineau, 2026). En 2023, le gaz naturel représentait encore 28 % de l'énergie consommée dans le secteur commercial et institutionnel (Whitmore & Pineau, 2026). Ainsi, l'amélioration de l'efficacité des systèmes de chauffage et la transition aux énergies renouvelables dans les bâtiments scolaires apparaissent comme des priorités incontournables.

Parmi les solutions renouvelables et efficaces envisageables, les thermopompes se distinguent par leur potentiel important pour le chauffage des bâtiments au Québec. Selon la Régie de l'énergie du Canada (2023), les thermopompes remplaceront progressivement le chauffage au gaz ainsi que les plinthes électriques dans le secteur résidentiel et commercial. La Figure 0.1 montre que les thermopompes répondront à environ la moitié des besoins en chauffage des bâtiments d'ici 2050. La capacité des pompes à chaleur géothermiques (PACG) à exploiter la chaleur du sol comme source d'énergie renouvelable et constante leur permet d'offrir une alternative efficace et durable comparativement aux systèmes de chauffage conventionnels. En effet, en tirant leur chaleur du sol, dont la température reste relativement constante durant l'année, les PACG gardent un rendement énergétique plus stable, même dans des conditions climatiques rigoureuses par rapport aux pompes à chaleur à air (PACA). Les PACG se caractérisent également par une durée de vie généralement plus longue en raison de l'absence de l'exposition directe aux variations météorologiques. Or, le coût d'acquisition et de mise en place nettement inférieur des PACA comparé aux PACG fait que la majorité des installations actuelles au Canada sont des PACA.

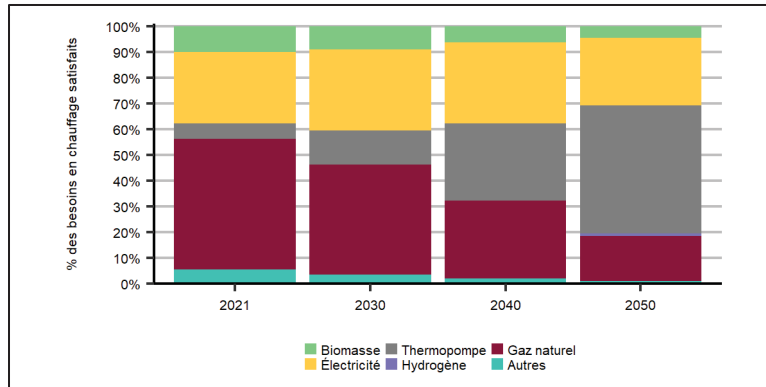


Figure 0.1 Chauffage résidentiel selon la technologie, scénario de carboneutralité à l'échelle mondiale. Tiré de Régie de l'énergie du Canada, 2023

Malgré ses avantages, un système de géothermie à puits verticaux couplé à des pompes à chaleur géothermiques (PACG) présente une contrainte importante : le coût élevé des forages. Le dimensionnement complet du champ de forages pour satisfaire les charges maximales peut nécessiter des profondeurs de forage importantes et engendrer des coûts initiaux élevés, ce qui limite l'intérêt économique de ces systèmes. Par ailleurs, dans les climats dominés par les besoins de chauffage, le dimensionnement des systèmes géothermiques verticaux en fonction de la charge maximale hivernale peut imposer un déséquilibre des charges thermiques au sol. Les besoins de refroidissement estivaux étant généralement beaucoup plus faibles, plus de chaleur sera extraite du sol qu'injectée sur une année, ce qui mènera à une réduction progressive de la température moyenne du sol à proximité du champ de puits et limitera le recours à la ressource. La Figure 0.2 montre que, pour un champ de puits où les besoins de chauffage sont prédominants, la température moyenne du sol diminue progressivement au cours des années d'exploitation. Cette baisse peut compromettre la viabilité opérationnelle à long terme du champ de puits.

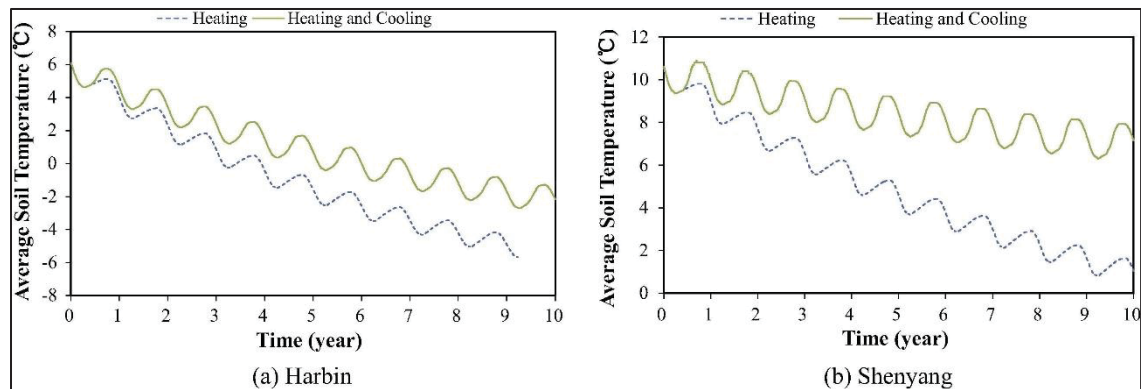


Figure 0.2 Température moyenne du sol dans les régions extrêmement froides. Tiré de You, Wu, Shi, Wang, & Li, 2016

L'approche répandue est donc de dimensionner le champ de puits pour garantir un équilibre annuel des charges de chauffage et de refroidissement. Une source d'appoint demeure donc nécessaire pour répondre aux pointes de demande, notamment lors des périodes de grands froids.

Or, les solutions auxiliaires traditionnellement utilisées posent un dilemme dans une perspective de décarbonation; l'utilisation d'une chaudière électrique comme auxiliaire contribuera aux pointes de consommation du réseau, tandis qu'une chaudière à combustible fossile entraînera des émissions de gaz à effet de serre. Dans les deux cas, les objectifs climatiques et les contraintes du réseau électrique seront mis sous pression. Il devient donc nécessaire d'identifier une solution de chauffage auxiliaire renouvelable, capable de s'intégrer à un système géothermique tout en répondant aux besoins de chauffage lors des périodes hivernales, sans augmenter la pointe électrique du bâtiment en période de pointe du réseau.

L'accumulateur thermique centralisé (ATC) répond précisément à cette contrainte. Cet appareil de stockage thermique consomme de l'électricité en dehors des périodes de pointe, la convertit en chaleur et la stocke dans des briques réfractaires, avant de la restituer au bâtiment lors des périodes de forte demande. En déplaçant ainsi la consommation électrique vers les heures hors pointe, l'ATC contribue à soulager le réseau d'Hydro-Québec tout en éliminant le recours aux combustibles fossiles. Il constitue ainsi une solution prometteuse pour remplacer la chaudière comme auxiliaire.

Ce couplage ATC-géo est présentement en opération ; il a été répertorié par Ido (2020) dans sept écoles primaires québécoises. Toutefois, sa performance est peu documentée dans la littérature. Les seuls travaux précédents y faisant référence (Ido, 2020; Morovat, 2024) ne faisaient que rapporter la présence des appareils, ils ne documentaient pas la performance de l'ATC utilisé comme système auxiliaire à un système PACG, ni les gains associés par rapport à un auxiliaire conventionnel. Ce mémoire vise à répondre à cette lacune.

0.2 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le potentiel du couplage de l'ATC comme source auxiliaire d'un système de chauffage géothermique dans une école primaire québécoise. Sachant que ce couplage ATC-géo est en opération dans les 7 écoles mentionnées plus haut, celles-ci serviront de cas d'étude pour ce projet ; elles sont ci-après traitées d'écoles de référence et fourniront un cadre réaliste pour l'étude.

L'évaluation de la performance énergétique de différentes stratégies de contrôle ou de différentes configurations de systèmes est couramment réalisée au moyen de la simulation numérique (Shi & Chen, 2021). Cette approche permet d'analyser l'influence de chaque stratégie tout en maintenant constantes les autres variables pouvant affecter les résultats. Toutefois, la représentativité des conclusions obtenues dépend directement de la qualité du modèle de base utilisé (Coakley, Raftery, & Keane, 2014). Dans le contexte de cette étude, la contribution des systèmes auxiliaires est principalement sollicitée lors des périodes de forte demande de chauffage. L'ampleurs des besoins de chauffage, ainsi que l'occurrence et l'intensité des pointes électriques, sont elles-mêmes fortement influencés par les caractéristiques du bâtiment, telles que son enveloppe, son occupation, ses horaires d'utilisation et la nature de ses systèmes CVCA. Par conséquent, l'utilisation d'un modèle non représentatif pourrait conduire à surestimer ou à sous-estimer les bénéfices associés aux différentes stratégies de gestion de la puissance dont le couplage ATC-géothermie.

Afin d'assurer que les simulations reflètent des conditions d'exploitation réalistes, cette étude s'appuie sur le développement d'un modèle archétype représentatif des sept écoles de références. En s'appuyant sur des données d'opération mesurées dans ces sept écoles, il sera

ainsi possible de vérifier que le modèle archétype représente adéquatement le comportement énergétique de ces écoles, et qu'il est adéquat pour quantifier le potentiel du couplage. Le développement et la vérification de cet archétype constitue ainsi une étape préalable essentielle à l'évaluation du potentiel des stratégies de gestion de la puissance.

L'objectif principal du projet est conséquemment décliné en trois sous-objectifs :

- 1) Développer un modèle archétype représentatif d'écoles primaires québécoises où un tel système est susceptible d'être employé ;
- 2) Simuler la performance énergétique d'un système de chauffage à géothermie avec auxiliaire électrique, avec un ATC comme auxiliaire et sans auxiliaire ;
- 3) Évaluer l'impact économique et énergétique des trois systèmes de chauffage à géothermie considérés.

Ce mémoire par article est présenté en cinq chapitres. Le chapitre 1 présente une revue de la littérature scientifique, complémentaire à celle de l'article de conférence, visant à introduire différentes notions essentielles à la compréhension de cet ouvrage. Ce chapitre commence par une revue des modèles archétypes d'écoles existant dans la littérature et les contraste aux caractéristiques du parc scolaire québécois. La revue présente également les particularités de modélisation des systèmes géothermiques dans le moteur de simulation EnergyPlus, et enfin présente le rôle d'un auxiliaire dans un système de PACG. Le chapitre 2 présente la méthodologie globale utilisée pour le projet. Le chapitre 3 présente la définition et le développement de l'archétype. Ce chapitre reprend les informations présentées dans deux rapports de stages Mitacs-Accélération effectués auprès du Laboratoire des technologies de l'énergie d'Hydro-Québec. Le premier stage (Mootamri, 2025a) fut réalisé entre le 15/07/2024 et le 15/01/2025, et le deuxième (Mootamri, 2025b) entre le 01/03/2025 et le 30/08/2025, tous les deux sous la cosupervision de F. Laurencelle et K. D'Avignon. Ce chapitre rapporte les étapes de documentation des 7 écoles où un tel couplage est présentement en fonction, ci-après nommés 'écoles de référence'. Il détaille l'ensemble des étapes d'analyse des sites menant à la définition de l'archétype et la création du modèle qui en émane. Les paramètres complets du modèle, incluant sa géométrie, ses horaires et densités d'occupation, ses charges internes ainsi que le système CVCA implémenté, y seront présentés. Le chapitre 4, rédigé sous la forme d'un article scientifique (Mootamri, Laurencelle, & D'Avignon, 2026), présente l'évaluation du

potentiel du couplage ATC-géothermie à travers la simulation de différents scénarios d'un système de chauffage à géothermie et le calcul d'indicateurs de performance. Le chapitre 5 est dédié à la discussion des résultats obtenus, présente les limites de l'étude et les recommandations pour les prochaines initiatives de recherche.

CHAPITRE 1

Revue de littérature

Ce chapitre présente une revue de littérature visant à détailler la problématique et supporter les choix méthodologiques effectués. Il est structuré en cinq sections. La première section décrit les principales caractéristiques du parc scolaire du Québec afin de faire une brève introduction aux particularités du parc dans son ensemble. La deuxième section est consacrée à une revue des modèles archétypes dans la littérature, en mettant l'accent sur ceux du parc scolaire québécois afin de vérifier si un archétype existant pourrait être utilisé dans le cadre de ce projet pour représenter les 7 écoles de référence. La troisième section décrit la partition typique des locaux des écoles primaires du Québec, nécessaire au développement d'un modèle archétype adapté à nos besoins. La quatrième section porte sur la méthode de modélisation des systèmes de pompes à chaleur géothermiques (PACG) dans EnergyPlus, notamment les modèles de sol non perturbé, les méthodes de calcul de la réponse thermique du sol et les modèles de thermopompes air-eau. Enfin, la dernière section présente le rôle du stockage thermique dans un système PACG afin de justifier l'intégration de l'ATC en tant que source auxiliaire au système.

1.1 Introduction au parc scolaire québécois

Le Projet Schola (Consortium de recherche Schola, 2022) a développé un guide afin de supporter les projets de rénovation effectués dans les écoles primaires du Québec et a, pour ce faire, répertorié différentes caractéristiques pertinentes à notre analyse. Il rapporte que l'envergure et l'âge du parc immobilier scolaire au Québec varient selon les régions administratives. Alors que plus de 60% de l'ensemble du parc immobilier scolaire québécois a été construit entre 1948 et 1965 pour répondre aux besoins du baby-boom¹, à Montréal, plus

¹ Le 'baby-boom' est période caractérisée par une forte croissance démographique qui a pris place entre 1944 et 1958.

de 20 % des écoles ont été construites avant 1948. Au contraire, le parc scolaire des régions de la Côte-Nord et du Nord-du-Québec s'est développé après 1965. Le parc dans son ensemble est donc relativement vieux, alors qu'il sera démontré au Chapitre 3 que les écoles de références sont de construction récente.

Issue du Projet Schola, Tremblay-Lemieux (2019) décrit dans son mémoire, l'influence de la période de construction de l'école sur sa géométrie et sa répartition spatiale. Elle rapporte que les écoles construites pendant la période du baby-boom se ressemblent dans leur répartition des espaces intérieurs : la majorité possède un corridor central, ce qui influence la répartition des salles de classe et le positionnement du gymnase. Parmi l'échantillon du Projet Schola, 50% des écoles primaires ont subi un agrandissement incluant un ajout d'espaces à l'extérieur du bâtiment existant, la démolition et la reconstruction de portion du bâtiment existant, la construction d'un nouveau pavillon ou l'annexion d'un bâtiment voisin (Consortium de recherche Schola, 2022). Ainsi, regrouper les écoles primaires québécoises par année de construction ne constitue pas un critère précis, car une part importante des écoles ont été agrandies, ce qui a pu modifier leur géométrie et/ou la composition d'au moins une partie de leur enveloppe. Une attention particulière devra donc être donnée à la forme et la répartition des locaux dans les écoles de références.

Les écoles primaires québécoises varient en taille et nombre d'élèves. Tremblay-Lemieux (2019) rapporte que les petites écoles (superficie totale de moins 1 500 m²) représentent 32 % du total des écoles et accueillent moins de 150 élèves, les écoles de taille moyenne (superficie totale entre 1500 m² et 10 000 m²) représentent 40 % du total des écoles et accueillent entre 150 et 349 élèves, alors que les grandes écoles (superficie totale de plus de 10 000 m²) représentent 28 % du total des écoles et accueillent entre 350 et 998 élèves. La taille de l'école et le nombre d'élèves influencent la consommation énergétique des bâtiments (Consortium de recherche Schola, 2022). En effet, une école plus grande nécessite plus d'énergie pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage en raison de son volume. D'autre part, un plus grand nombre d'élèves intensifie l'utilisation des espaces, entraînant une demande élevée pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et l'eau chaude sanitaire. De nombreuses écoles sont déjà en surcapacité et plusieurs projets d'agrandissement ou de construction de nouvelles

écoles sont envisagés ou nécessaires pour accueillir ces élèves (Consortium de recherche Schola, 2022). Une petite école avec un grand nombre d'élèves peut donc présenter une intensité énergétique élevée en raison de la densité d'occupation. Non seulement la taille des écoles de référence devra donc être documentée, mais également leur nombre d'élèves.

La province de Québec est divisée en quatre grandes zones climatiques selon (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021). Selon le Projet Scola (Consortium de recherche Schola, 2022), 58% des écoles primaires publiques se trouvent dans la zone 6, caractérisée par un climat froid et sec. La zone 7a, avec un climat très froid, abrite 39 % des écoles. Seules 3 % des écoles se trouvent dans la zone 7b froid sévère et 0,1 % dans la zone 8 subarctique. Ces zones climatiques influencent les conditions d'ensoleillement, de vent et de précipitations, affectant ainsi la ventilation naturelle et l'apport de lumière naturelle et, par conséquent, la demande énergétique des bâtiments scolaires. Bien que les conditions météorologiques sont des paramètres faciles à manipuler dans une simulation énergétique, les bâtiments sont construits en fonction du climat auquel ils seront exposés. Il sera donc important d'assurer une cohérence entre l'enveloppe et la zone climatique retenue pour les simulations

1.2 Modèles archétypes dans la littérature

Selon l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2025), la modélisation énergétique des bâtiments repose sur la représentation mathématique d'un système visant à prédire sa réponse sous différentes conditions d'exploitation. Dans la littérature, deux principales approches de modélisation sont distinguées (Swan & Ugursal, 2009): les modèles physiques et les modèles basés sur les données. Les modèles physiques, également appelés modèles directs ou *forward models*, s'appuient sur les lois fondamentales de la physique pour représenter les phénomènes de transfert de chaleur et de masse au sein du bâtiment. Ils nécessitent une description détaillée des caractéristiques du bâtiment, incluant sa géométrie, ses matériaux, ses systèmes techniques ainsi que les conditions climatiques. Ces modèles sont à la base de logiciels de simulation énergétique, tels que *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *ESP-r* ou *DOE-2*. À l'inverse, les modèles basés sur les données (*inverse models*) exploitent des observations de consommation afin d'établir des relations statistiques entre les variables

d'entrée et les performances énergétiques, sans recourir à une représentation physique détaillée du bâtiment. Dans le cadre de ce mémoire, un modèle physique est retenu. Ce choix est motivé par la nature des données disponibles ; d'une part, les caractéristiques physiques des 7 écoles de références sont accessibles, d'autre part, il sera nécessaire de comparer la performance de différents scénarios dont certains sont fictifs (c.-à-d. scénario sans auxiliaire, et avec chaudière électrique) pour lesquels des historiques de consommation ne sont pas disponibles.

Le passage de la modélisation d'un bâtiment individuel à celle d'un parc immobilier nécessite des approches adaptées permettant de représenter un grand nombre d'unités à différentes échelles. Dans ce contexte, différentes méthodes de modélisation énergétique existent lorsqu'une étude passe à l'échelle d'un quartier (en anglais *district energy modelling*), notamment les approches *top-down* et *bottom-up*, se distinguent principalement par le niveau d'agrégation des données utilisées et la manière dont la consommation énergétique est représentée (Swan & Ugursal, 2009). Les approches *top-down* utilisent des données agrégées de consommation énergétique et des variables macroéconomiques pour expliquer la demande énergétique globale du secteur, tandis que les approches *bottom-up* estiment la consommation à partir de la modélisation de bâtiments individuels ou de groupes de bâtiments avant extrapolation à l'ensemble du parc.

L'application à grande échelle de l'approche *bottom-up* implique toutefois des contraintes importantes. Elle nécessite en effet un grand nombre de données d'entrée relatives aux caractéristiques des bâtiments, lesquelles peuvent être incomplètes ou difficilement accessibles. Par ailleurs, la simulation individuelle d'un grand nombre d'unités engendre des coûts de calcul élevés ainsi qu'une complexité importante de mise en œuvre. Dans ce contexte, la gestion de l'hétérogénéité du parc immobilier devient un enjeu majeur. Afin de réduire cette complexité tout en conservant un niveau de précision acceptable, des méthodes de simplification sont adoptées, notamment par l'utilisation de bâtiments représentatifs ou de groupes de bâtiments similaires, appelés archétypes.

Un archétype correspond à une représentation simplifiée d'un sous-ensemble du parc immobilier partageant des caractéristiques communes (usage, période de construction, géométrie, systèmes énergétiques, etc.), permettant de réduire la complexité de la modélisation

tout en conservant une représentation cohérente du comportement énergétique global. Dans le cadre de ce projet, la solution retenue sera de créer un seul modèle de bâtiment qui sera globalement représentatif des 7 écoles de références, plutôt que de créer un modèle distinct pour chacune d'entre elles. Ce modèle sera traité comme une forme d'archétype représentatif de ce sous-ensemble d'écoles, faisant elles-mêmes partie du parc plus large des écoles primaires québécoises. Cette approche permettra ainsi à la fois de bien représenter l'apport du couplage dans les 7 écoles de références, mais également d'ajouter un modèle archétype additionnel à l'inventaire existant dans la littérature.

1.2.1 Définition des caractéristiques d'un modèle archétype

La littérature établit des étapes spécifiques pour développer un ou plusieurs archétypes d'un parc de bâtiments (Jadaa & McArthur, 2024; Pristerà, Allacker, Rock, & Sala, 2023; Swan & Ugursal, 2009). La première est d'identifier les caractéristiques requises de l'archétype qui dépendront de l'usage attendu pour celui-ci (p. ex. simulation de la performance énergétique, analyse du marché immobilier, planification urbaine, etc.). Ensuite, il est nécessaire de construire une base de données qui regroupe les caractéristiques requises sur le parc à étudier, à partir de différentes sources. Finalement, la répartition des caractéristiques du parc étudié doit être quantifiée afin d'en dégager les tendances. Il faut choisir quelles caractéristiques sont significatives dans le contexte et quelles caractéristiques deviendront plutôt des paramètres variables de l'archétype. Il sera alors possible de créer des groupements de bâtiments selon les caractéristiques retenues et de déterminer combien d'archétypes seront nécessaires à la représentation du parc étudié.

Une brève revue de la littérature nous a permis d'identifier différentes études documentant le processus utilisé pour développer un archétype représentatif d'un parc immobilier donné et d'ainsi voir des exemples de cette méthodologie en application. Les caractéristiques documentées dans chaque étude sont répertoriées au Tableau 1.1.

Parekh (2005) a développé des archétypes représentatifs des bâtiments résidentiels canadiens pour une analyse rapide de l'efficacité énergétique de ces bâtiments. Il a identifié 3 catégories principales de données pertinentes pour les bâtiments résidentiels : les caractéristiques

géométriques, les caractéristiques thermiques et les paramètres de fonctionnement. Dans le cadre du parc résidentiel, les caractéristiques géométriques comprenaient : la forme, le nombre d'étages, la forme du toit et le type de fondation. Les caractéristiques thermiques incluaient un regroupement selon l'année de construction et la zone climatique. Les paramètres de fonctionnement incluaient : le profil de charge associée à l'éclairage et aux appareils électroménagers, le nombre d'occupants et le profil de leur taux de présence dans le bâtiment et le profil d'utilisation de l'eau chaude sanitaire dans la maison.

Cerezo, Sokol, Reinhart, et Al-Mumin (2015) ont comparé trois méthodes de création d'archétypes pour la modélisation énergétique urbaine. La première consiste à regrouper les bâtiments uniquement selon leur fonction (résidentielle, bureaux, etc.) et à utiliser les caractéristiques issues de la littérature. Bien que cette approche soit simple et largement utilisée en raison du fréquent manque de données détaillées disponibles, Cerezo et al. ont démontré qu'elle surestimait l'intensité énergétique (*Energy Use Intensity, EUI*, en anglais) moyenne des 140 bâtiments résidentiels étudiés de 18%. La deuxième méthode employée subdivisait les bâtiments selon des caractéristiques additionnelles, comme l'âge ou la taille, et s'appuierait sur la documentation d'un échantillon représentatif de bâtiments pour chaque archétype. Par exemple, dans le cadre de cette étude, les rapports fenêtre-mur (*window-to-wall ratio (WWR)*, en anglais) de chaque bâtiment ont été évalués individuellement par une analyse photographique. Pour Cerezo et al., cette approche améliore considérablement la précision des simulations, menant à une erreur sur l'intensité énergétique moyenne de seulement 3 %, malgré qu'elle supposait des comportements identiques pour les occupants. Enfin la troisième méthode intègre des paramètres d'occupation probabilistes modélisés par une approche de Monte-Carlo afin de représenter la variabilité du comportement des occupants. Cette dernière méthode permet de mieux reproduire les consommations énergétiques observées en tenant compte de l'incertitude associée aux habitudes d'occupation et d'utilisation des bâtiments. Cette méthode a obtenu une distribution de *EUI* beaucoup plus proche de la distribution réelle par rapport aux deux méthodes précédentes, mais elle ne prend en compte que quelques sources d'incertitudes, principalement liées au comportement des occupants (comme la température de consigne, l'éclairage et l'occupation). Cela veut dire qu'elle ne considère pas tous les facteurs

qui peuvent influencer la consommation réelle d'un bâtiment. Par exemple, des éléments importants, comme les infiltrations d'air ou l'ouverture des fenêtres peuvent aussi avoir un impact, mais ils ne sont pas inclus dans cette méthode. En plus, avant d'utiliser cette approche, il faut d'abord faire une étape supplémentaire pour identifier quels paramètres sont vraiment importants (analyse de sensibilité). Sans ça, on risque de compliquer le modèle inutilement. La méthode doit aussi être mieux validée statistiquement, par exemple en testant plusieurs échantillons pour vérifier si les résultats sont fiables. Enfin, cette approche est difficile à appliquer dans la pratique parce qu'elle nécessite beaucoup de données détaillées sur les comportements des occupants, et elle n'est pas encore largement intégrée dans les outils de simulation courants.

Trois autres études (Adebisi, Kemp, & McArthur, 2024; Michel; Bernier, Adam; Neale, & Michael; Kummert, 2024; Jadaa & McArthur, 2024) ont également développé des archétypes représentant des bâtiments résidentiels canadiens ou québécois. Les caractéristiques utilisées sont présentées dans le Tableau 1.1. Bien que visant le parc immobilier résidentiel, ces trois études avaient le même usage attendu pour leur archétype que le présent projet, soit de faire des modèles numériques permettant la simulation de la performance énergétique du parc étudié. On constate que ces trois études ont ajouté des caractéristiques de type « thermiques » qui n'avaient pas été considérées par Parekh et Cerezo et al., incluant la source de chauffage des locaux (p. ex. le carburant fossile, l'électricité, une thermopompe, un système hybride, etc.), la source de chauffage de l'eau chaude sanitaire (mêmes options que précédemment), la présence ou non d'un système de climatisation, ainsi que la présence ou non d'un système de ventilation mécanique. Selon Vanroy (2022), les systèmes CVCA jouent un rôle déterminant dans la performance énergétique globale, la répartition des sources d'énergie et les puissances de pointe. Leur représentation est donc un élément critique dans le développement de modèles archétypes destinés à l'analyse de scénarios de décarbonation et d'efficacité énergétique.

Tableau 1.1 Caractéristiques répertoriées des différents archétypes

	Caractéristique	Parekh (2005)	Cerezo et al. (2015)	Bernier et al. (2024)	Jadaa & McArthur (2024)	Adebisi, et al. (2024)
Caractéristiques géométriques	Forme	x			x	
	Nombre d'étages	x		x		
	Forme du toit	x		x		
	Type de fondation	x				
Caractéristiques thermiques	Année de construction	x	x			x
	Zone climatique	x				
	Résistance thermique, R			x	x	
	Ratio fenêtre-mûr			x	x	
	Source de chauffage			x		x
	Source de chauffage des locaux			x		x
	Source de chauffage de l'eau chaude sanitaire			x		x
	Présence de climatisation			x		x
	Présence de ventilation					x
Paramètres de fonctionnement	Horaires d'occupation	x	x			
	Nombre d'occupants	x		x		
	Charge aux prises	x	x	x		
	Profil de température intérieure		x	x		
	Profil de charge de l'éclairage	x	x	x		
	Densité d'infiltration d'air			x		
	Densité d'utilisation de l'eau chaude sanitaire	x	x			

On peut conclure que les caractéristiques qui doivent nécessairement être documentées afin de développer un archétype adéquat à nos besoins comportent les trois groupes identifiés plus haut : les caractéristiques géométriques, les caractéristiques thermiques et les paramètres de fonctionnement listé au Tableau 1.1. Ainsi, on peut regrouper les bâtiments selon ces différentes caractéristiques et créer un ou plusieurs archétypes.

1.2.2 Modèles archétypes du parc scolaire québécois

Cette section présente une revue des modèles archétypes du parc scolaire québécois qui va permettre d'identifier les approches de modélisation proposées, les hypothèses retenues ainsi que leurs limites. Elle sert de point de départ pour identifier si un modèle archétype existant serait adapté aux objectifs de cette étude. Il sera démontré qu'aucun modèle existant ne se conforme aux caractéristiques des écoles de références, rapportées au Chapitre 3, et conséquemment, les informations relevées serviront à soutenir la création d'un nouvel archétype d'école.

1.2.2.1 Générateur d'archétype de SIMEB

Sansregret et Millette (2009) ont développé une fonctionnalité dans le logiciel de simulation de performance énergétique SIMEB permettant de faciliter la génération d'un modèle archétype d'un bâtiment commercial ou institutionnel. Leur 'générateur d'archétype' nécessite l'identification de cinq variables indépendantes : l'activité principale du bâtiment (bureaux, éducation, commerce...), la superficie du plancher, l'année de construction, l'emplacement et la source principale de chauffage. Le générateur s'appuie ensuite sur une base de données pour créer un modèle ayant des caractéristiques représentatives de celles de ce type de bâtiment dans le parc immobilier québécois. La base de données à partir de laquelle les caractéristiques sont sélectionnées provient essentiellement de trois sources d'informations :

- Le programme d'analyse énergétique des bâtiments 1991-1997 [PAEB] : Ce programme comporte des rapports détaillés sur l'analyse énergétique de plus de 14 000 bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec, basés sur un audit complet réalisé par un groupe d'ingénieurs et de techniciens. Cette source contient un échantillon de 803 bâtiments scolaires.
- L'étude de suivi des comportements énergétiques – Marché commercial -1992 [SUIVI] : C'est une enquête téléphonique menée par une équipe d'enquêteurs sur un échantillon de 2 651 bâtiments à travers le Québec, dont 379 bâtiments scolaires.

- Les dossiers de soumission au programme incitatif d'Hydro-Québec [PEP] : Ce dernier comporte plus de 400 projets qui ont été soumis au programme incitatif d'Hydro-Québec entre 2004 et 2007. Chaque projet comprenait un fichier de simulation énergétique compatible avec le logiciel SIMEB. Les dossiers incluaient ceux de 108 bâtiments scolaires.

Le 'générateur d'archétype' crée un modèle numérique de bâtiment complet avec des caractéristiques représentatives en utilisant peu d'informations. Les caractéristiques de fonctionnement (p. ex. la superficie, la densité d'éclairage et de charges électriques, l'exposition des murs, etc.) sont transmises au logiciel SIMEB qui réalise le zonage thermique du bâtiment à l'aide d'un algorithme intégré. Une des contraintes du 'générateur d'archétypes' est que l'architecture du bâtiment modélisé devra être de forme rectangulaire. Tous les murs extérieurs, quelle que soit leur orientation, devront également présenter la même proportion de fenêtres. La configuration de tous les murs sera identique², la valeur R sera modifiée en changeant l'épaisseur de l'isolation rigide. Pour les systèmes CVCA, un seul équipement est généré pour desservir une fonction, indépendamment de la superficie totale du bâtiment (p. ex. un seul refroidisseur dessert toute la superficie). De plus, bien que divers systèmes CVCA peuvent être choisis (c.-à-d. un système à double conduit, un système à volume constant, un système à volume d'air variable (VAV) ou des plinthes électriques), un seul type de système CVCA est appliqué à l'ensemble du bâtiment. Un système de géothermie à puits verticaux couplé à des pompes à chaleur géothermiques (PACG) ne fait pas partie des options possibles. Seules certaines zones, telles que les gymnases, les stationnements intérieurs et les cuisines, se verront automatiquement assigner des systèmes adaptés à leurs besoins particuliers en matière de ventilation et de contrôle thermique. Cette approche permet de simplifier la représentation des bâtiments, tout en maintenant une certaine flexibilité pour les espaces aux exigences particulières. Cette hypothèse est pertinente pour ce projet, puisqu'elle identifie les gymnases et les cuisines comme des zones présentant des besoins spécifiques, nécessitant un traitement

² Une rangée de briques, un espace d'air de $\frac{3}{4}$ de 1.9 cm avec une isolation rigide et un panneau de plâtre.

distinct dans les modèles archétypes afin de rester cohérent avec la réalité physique des bâtiments scolaires.

Sachant qu'un système de géothermie est absent des archétypes générés par SIMEB, ceux-ci ne pourraient pas être utilisés sans modifications dans le cadre de ce projet. Il demeure possible que la géométrie du modèle, la disposition des locaux (usage et horaires) et l'enveloppe puissent être utilisées (cela sera vérifié suite à l'inventaire des 7 écoles de références dans le Chapitre 3), mais le système CVCA aurait à être rebâti à neuf.

1.2.2.2 Prototypes sur Energy Plus

EnergyPlus utilise le Standard ASHRAE 90.1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010) et les bâtiments de référence commerciaux du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE) (U.S. Department of Energy, 2011) comme base de données de référence pour générer des types d'espaces et des ensembles de construction pour une école primaire américaine. À partir du Standard ASHRAE 90.1 sont définis des modèles de construction typiques pour les enveloppes de bâtiments, les charges internes et les types de systèmes CVCA en fonction des zones climatiques. Les matériaux de construction (murs, toits, sols, fenêtres) sont attribués conformément aux spécifications de l'ASHRAE 90.1 pour différents types de bâtiments et zones climatiques. Les modèles prototypes du DOE pour les bâtiments commerciaux fournissent des types d'espaces et des ensembles de construction prédéfinis pour différentes catégories de bâtiments commerciaux. Les données proviennent des bâtiments de référence commerciaux du DOE, utilisés pour garantir la conformité avec le Standard ASHRAE 90.1. La bibliothèque de normes d'OpenStudio (*OpenStudio-Standards*) automatise l'attribution des matériaux, des charges internes, des configurations CVCA et des horaires énergétiques afin de garantir la conformité avec les référentiels de performance énergétique d'ASHRAE 90.1. Ces sources de données simplifient le processus de modélisation en fournissant des horaires d'occupation, des configurations CVCA et des repères de performance énergétique spécifiquement adaptés aux écoles primaires dans différentes zones climatiques, y compris la zone climatique 6A caractérisant la majorité de la province du Québec.

Il existe deux différences importantes entre les écoles québécoises et américaines, justifiant ainsi pourquoi le recours aux prototypes du DOE serait préjudiciable : la forme et l'accès à la lumière naturelle. La forme du prototype DOE de l'école primaire américaine est décrite comme celle de doigts (*'fingered' shape* ou *'E form'*) (National Institute of Standards and Technology, 2019), il sera démontré au Chapitre 3 que c'est un décalage important avec la forme relativement compacte des 7 écoles de référence. En effet, la compacité relative (*relative compactness*) des bâtiments, un paramètre reliant le volume d'un bâtiment à la superficie de son enveloppe extérieure, est reconnue comme ayant une influence importante sur la consommation d'énergie d'un site (AlAnzi, Seo, & Krarti, 2009). De plus, les archétypes américains ont des ratios fenêtre-mur sous les 25% et moins de 10% de leur empreinte au sol à un accès à la lumière naturelle. Cette caractéristique est distinctement différente des écoles étudiées (voir les caractéristiques des écoles de référence au Chapitre 3). Il est donc jugé préjudiciable d'utiliser un prototype du DOE comme archétype représentatif des 7 écoles de référence.

Selon Vanroy (2022), il n'existe pas, au Canada et plus particulièrement au Québec, de bibliothèque complète de modèles archétypes de bâtiments validés et représentatifs du parc bâti local. Cette absence oblige les chercheurs à développer leurs propres modèles ou à recourir à des modèles de référence étrangers. Dans ce contexte, les modèles prototypes développés par le *Department of Energy* (DOE) des États-Unis sont largement utilisés dans les études canadiennes, principalement en raison de leur accessibilité, de leur documentation détaillée et de certaines similitudes climatiques et réglementaires entre les deux pays. Toutefois, ces modèles ne représentent pas intrinsèquement le parc bâti canadien ou québécois. Ainsi, leur utilisation doit être comprise comme une base de départ méthodologique plutôt que comme une représentation directement compatible du contexte québécois. Plusieurs études (Abolhassani, Amayri, Bouguila, & Eicker, 2022; CanmetENERGY; Hepting, 2020) ont d'ailleurs montré que ces modèles doivent être adaptés pour intégrer les caractéristiques locales, notamment en ce qui concerne la géométrie, les propriétés de l'enveloppe et les systèmes CVCA. En conclusion, un modèle archétype développé pour les écoles québécoises pourrait reposer sur les types d'espaces et des ensembles de constructions prédéfinis pour une

école primaire américaine située en zone climatique 6A dans OpenStudio, une interface graphique utilisant EnergyPlus comme moteur de simulation, mais le recours direct aux prototypes du DOE sans ajustements de leur forme et ratio de fenestration serait probablement préjudiciable.

1.2.2.3 Archétype Québec

Archétype Québec est une initiative portée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) du Québec, l'Université Concordia, l'École Polytechnique de Montréal et Hydro-Québec, visant à développer une représentation du parc de bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels du Québec (Québec, 2025). Le projet a 3 objectifs principaux : 1) de créer un parc virtuel représentatif des bâtiments du Québec en utilisant des archétypes basés sur des données réelles, 2) d'exploiter les modèles pour évaluer les impacts énergétiques potentiels des mesures d'efficacité énergétique à grande échelle, et 3) d'identifier des mesures d'économie d'énergie adaptées en fonction de la vocation des bâtiments. Dans cette section, nous nous attarderons à leurs modèles archétypes de bâtiments scolaires seulement.

Les modèles archétypes d'établissements scolaires produits dans le cadre d'Archétype Québec représentent les caractéristiques dominantes du parc immobilier des écoles primaires et secondaires du Québec (géométrie, la période de construction et la configuration des systèmes CVCA) (Delcroix et al., 2026). Les caractéristiques des modèles générés à ce jour sont présentées dans le Tableau 1.2. Pour ce qui est de la structure, deux périodes de construction sont représentées, soit les bâtiments construits avant 1970, caractérisés par une structure en béton, et ceux construits après 1970, reflétant des pratiques de construction plus récentes en acier. Les seuls changements à l'enveloppe entre les modèles représentant des bâtiments construits entre 1970 et 2012 vis-à-vis de ceux construits après 2012 sont au niveau de la résistance thermique des matériaux d'isolation utilisés. Tous les modèles sont équipés d'un système central de chauffage hydronique, alimenté par une chaudière électrique, toutefois, la présence d'une ventilation mécanique est variable. Les bâtiments non ventilés ne font recours qu'à la ventilation naturelle, tandis que les bâtiments ventilés sont dotés d'un système de

ventilation à débit d'air constant (CAV) avec recirculation de l'air. Dans les plus grands bâtiments (tel l'Archétype 3, représentant une école secondaire de grande taille), un système de climatisation peut s'ajouter.

Tableau 1.2 Archétype Québec pour les établissements scolaires

	Archétype 1 (Vanroy, 2022)	Archétype 2		Archétype 3	
Usage	Primaire	Primaire/Secondaire		Secondaire	
Enveloppe	Pré-1970				
	1970-2012	-		-	
	Post-2012	-		-	
Surface habitable	±1600 m²	±3000 m²		±17 000 m²	
Système CVCA	Sans vent. méc.	Sans vent. méc.	Avec vent. méc.	Avec vent. méc., sans clim.	Avec vent. méc. avec clim.

On conclut qu'aucun des archétypes présentement disponibles n'est représentatif des 7 écoles de référence. L'utilisation du générateur d'archétype de SIMEB n'est pas possible à cause de l'absence d'un système de géothermie dans les archétypes générés. Pour le prototype du DOE, on a identifié deux différences importantes entre les écoles québécoises et américaines, justifiant ainsi pourquoi le recours aux prototypes du DOE serait préjudiciable. Concernant l'utilisation de l'un des archétypes d'Archétype Québec, ceux-ci comportent plusieurs lacunes qui excluent leurs utilisations directes pour représenter les écoles de référence, dont la taille, l'absence de la ventilation mécanique, l'enveloppe trop âgée et la forme qui pourrait affecter la consommation énergétique du site (plus de détails seront fournis au Chapitre 3 lors de la présentation des écoles de référence). Il serait donc inutile d'utiliser un des archétypes comme base pour ensuite en modifier la géométrie, la partition des espaces, l'enveloppe et le système CVCA, éliminant tout gain potentiel sur le temps de modélisation requis.

De plus, la représentativité du modèle archétype ne se limite pas à reproduire les caractéristiques physiques générales des bâtiments scolaires, mais doit également permettre de représenter adéquatement leur comportement énergétique. Deux aspects sont particulièrement importants pour cette étude. Premièrement, le modèle doit être en mesure de produire les charges nominales de chauffage et de refroidissement, puisque celles-ci influencent

directement le dimensionnement du champ de puits géothermiques. Deuxièmement, le modèle doit représenter adéquatement les caractéristiques des pointes de puissance électrique, soit leur moment d'occurrence, leur durée et leur amplitude. Ces paramètres sont essentiels dans le contexte de l'intégration d'un stockage thermique comme auxiliaire. En effet, le moment d'occurrence de la pointe permet d'identifier une stratégie de charge/décharge adéquate, la durée de la pointe détermine la quantité d'énergie thermique à emmagasiner, et enfin, l'amplitude de la pointe électrique permet de déterminer la capacité nominale du stockage à installer.

Les archétypes disponibles n'ont pas été validés pour ce qui est des caractéristiques des pointes de puissance électrique, soit le deuxième aspect qui est lié à l'implémentation du stockage thermique. En effet, Vanroy (2023) a rapporté que la pointe de son modèle de petite école (Archétype 1) est deux fois plus grande que celle observée sur les compteurs de bâtiments réels. Ainsi, bien que certains modèles archétypes de la littérature puissent présenter des similitudes avec les 7 écoles étudiées, leur capacité à reproduire un profil électrique comparable à celui des écoles de références demeure incertain. Un nouvel archétype devra donc être développé pour ce projet.

1.3 Partition des locaux du parc scolaire québécois

Cette section présente la partition des locaux d'une école primaire selon différentes sources en vue de son application pour le modèle archétype.

Une école primaire québécoise a différentes fonctions éducatives qui nécessitent des locaux de caractéristiques différentes et ayant des paramètres de fonctionnement différents (p. ex. l'enseignement régulier vs le service de garde). Ces fonctions impactent aussi l'organisation et la distribution des espaces, constituant ainsi un facteur important dans le développement d'archétypes représentatifs. Comme illustré au Tableau 1.3, le Projet Schola regroupe les espaces des écoles selon le type de fonction éducative, en se basant sur les catégories de fonctions du MEQ (Consortium de recherche Schola, 2022; Ministère de l'Éducation, 2017). La fonction 'enseignement' comprend l'enseignement régulier (classes de maternelles et classes du primaire), l'enseignement adapté (adapté aux élèves ayant des besoins particuliers)

et l'enseignement spécialisé (incluant le gymnase). La fonction 'éducative complémentaire' comporte les classes ressources et la bibliothèque. La troisième fonction est dédiée au service de garde et les espaces polyvalents. Le Tableau 1.3 présente la partition des locaux d'une école primaire telle que définie par l'équipe de Schola, le MEQ (Consortium de recherche Schola, 2022; Ministère de l'Éducation, 2017), le générateur d'archétype SIMEB et le programme OpenStudio.

Tableau 1.3 Partition des espaces des écoles primaires selon différentes sources

Schola	MEQ	SIMEB	OpenStudio	Archétype proposé
Enseignement régulier	Classes de maternelle	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
	Classes du primaire	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
Enseignement adapté (Classes pour les élèves avec besoins particuliers)	Classes d'accueil et francisation	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
	Classes EHDA	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
Enseignement spécialisé (Arts, langues secondes, gymnase)	Classes spécialisées	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
	Éducation physique	Gymnase	Gymnase	Gymnase
Services éducatifs complémentaires	Classes ressources	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
	Bureaux du personnel de soutien et professionnel	Bureaux	Bureaux	Administration
	Bibliothèque	Bibliothèque	Bibliothèque	Bibliothèque
Garde scolaire et locaux connexes	Service de garde	Salle de classe	Salle de classe	Salle de classe
	Espace polyvalent (incluant cuisinette)	Cafeteria	Cafeteria / Cuisine	Salle de classe
Administration	Locaux administratifs et locaux du personnel	Bureau	Bureau	Administration
Aires de services	Toilettes	Toilettes	Toilettes	Toilettes
	Vestiaires	Toilettes	Toilettes	Toilettes
	Dépôts/rangements	Salle mécanique	Salle mécanique	Dépôt
	Circulation, murs et cloisons	Corridors	Corridors	Corridors
	Mécanique et électricité	Salle mécanique	Salle mécanique	Salle mécanique

À partir des partitions proposées par les différentes sources, il est possible d'en établir une qui regroupe les espaces ayant des caractéristiques similaires, telles que leur fonction (salle de classe, couloirs, etc.), leur densité et leur horaire d'occupation, ainsi que leurs besoins en

conditionnement d'air. Cette partition, destinée à l'archétype proposé, est présentée dans la colonne de droite du Tableau 1.3. Dans la partition de l'archétype, un espace est considéré comme une salle de classe s'il s'agit d'une classe primaire, d'une salle de garde, d'un espace polyvalent ou d'une classe d'accueil et francisation. Il est considéré que cet espace est conditionné pendant les heures d'occupation, avec un horaire uniforme, et il accueille généralement un enseignant ainsi qu'un nombre important d'élèves. Les espaces identifiés comme 'salle mécanique' ou 'dépôt' ne sont ni conditionnés ni occupés. Les espaces administratifs comprennent les bureaux, tels que le secrétariat, la direction ou la salle de photocopie, où l'on observe généralement un ratio personnel/élèves plus élevé que dans une classe. Enfin, les corridors, halls ou escaliers sont considérés comme des espaces des corridors, donc des espaces non occupés.

1.4 Modélisation des systèmes géothermiques dans EnergyPlus

Au Québec, la géothermie utilisée est de la géothermie à très basse température (Grasby et al., 2012). Le système géothermique comprend typiquement un circuit souterrain, une thermopompe et un système de distribution (Hydro-Québec, 2026d). Il existe principalement 3 types de circuit souterrain géothermique :

- Circuit souterrain à boucle ouverte
- Circuit souterrain à boucle fermée (verticale ou horizontale)
- Puits à colonne permanente

Puisque la boucle géothermique verticale est la plus répandue au Québec et que les 7 écoles de références utilisent des boucles verticales fermées, l'étude se concentre uniquement sur cette configuration.

Lors du dimensionnement d'un champ de puits géothermique, on a besoin de savoir la température du sol à différentes profondeurs tout au long de l'année et la réponse thermique du sol. Pour ce faire, on utilise des modèles pour estimer cette température du sol et des modèles pour représenter la réponse thermique du sol appelé *g-function*. Dans EnergyPlus, 3 modèles de température du sol non perturbé sont disponibles (U.S. Department of Energy, 2022) : 1) le modèle de différence finie, 2) le modèle de Kusuda-Achenbach, et 3) le modèle

de Xing. Aussi, il y en a deux modèles de *g-function* dans EnergyPlus soient UHFcalc (*Uniform Heat Flux*) et UBHWTcalc (*Uniform Borehole Wall Temperature*). Les propriétés de sol et les caractéristiques des puits utilisés dans le modèle archétype se trouvent dans la section ‘*Ground loop heat exchanger*’ du Chapitre 4.

1.4.1 Modèles de température du sol non perturbé

1.4.1.1 Modèle par différence finie

Cette méthode utilise un modèle unidimensionnel implicite à différence finie pour déterminer la température annuelle stable et périodique du sol non perturbé. Ce modèle numérique est basé sur l'équation transitoire de transfert de chaleur et de masse. Le modèle, qui utilise un pas de temps journalier, est exécuté sur une année de simulation à l'aide du fichier météorologique fourni par l'utilisateur afin de déterminer les moyennes quotidiennes du rayonnement horizontal global, de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent jusqu'à ce qu'une température du sol stable et périodique soit déterminée. La base du modèle a été tirée de Xing (2014) qui utilise une méthode explicite, conditionnellement stable, mais les méthodes numériques ont été adaptées à partir de celles décrites dans Lee (2013) qui utilise une méthode implicite de différences finies numériquement stable. Le modèle prend en considération la composition du sol à travers la conductivité thermique du sol, la densité du sol et la chaleur spécifique du sol. L'évapotranspiration et le gel du sol, en tenant compte d'une humidité stagnante supposée, sont également considérés.

1.4.1.2 Modèle de Kusuda-Achenbach

La corrélation développée par Kusuda et Achenbach pour définir la température du sol utilise la température moyenne de surface du sol comme intrant, son amplitude annuelle, ainsi que le jour de la température minimale de surface pendant la période analysée. Il repose sur l'hypothèse que la variation de la température de la surface du sol suit un régime périodique calculé par un modèle harmonique simple. Le calcul est effectué selon l'équation (1.1).

$$T(z, t) = \bar{T}_s - \Delta\bar{T}_s \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \theta\right) \quad (1.1)$$

Avec

$T(z, t)$: la température du sol non perturbé en fonction du temps (t) et de la profondeur (z), en degrés Celsius,

$\bar{T}_s$: la température annuelle moyenne de la surface du sol, en degrés Celsius,

$\Delta\bar{T}_s$: l'amplitude de la variation annuelle de la température de surface du sol, en degrés Celsius,

θ : le déphasage,

α : la diffusivité thermique du sol en m^2/jr ,

τ : la constante de temps, soit 365 jours,

t : pas de temps de simulation, en jours.

Ce modèle à une harmonique simple est suffisamment précis pour estimer la variation réelle de la température du sol en fonction de la profondeur. Lorsque des précipitations, des chutes de neige et un gel ou dégel du sol se produisent à certains endroits, un modèle à deux harmoniques (Modèle de Xing) est préférable parce qu'il prend en compte à la fois la variation annuelle et la variation semi-annuelle de la température de surface du sol.

1.4.1.3 Modèle de Xing

Ce modèle utilise la corrélation développée par Xing en 2014 pour le calcul de la température du sol. Les données nécessaires coïncident en grande partie avec celles utilisées par Kusuda et Achenbach, bien que Xing propose l'intégration d'une deuxième harmonique, comme on peut le constater à l'équation (1.2). En intégrant la deuxième harmonique, ce modèle améliore la représentation des fluctuations de la température rapides liées aux conditions climatiques extrêmes, comme l'accumulation de neige.

$$T(z, t) = \bar{T}_s - \sum_{n=1}^2 \Delta \bar{T}_{s,n} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha\tau}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau}(t - \theta_n) - z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha\tau}}\right) \quad (1.2)$$

Avec

$T(z, t)$: la température du sol non perturbé en fonction du temps et de la profondeur,

$\bar{T}_s$: la température annuelle moyenne de la surface du sol, en degrés Celsius,

$\Delta \bar{T}_{s,n}$: la n-ième amplitude du changement de température du sol tout au long de l'année, en degrés Celsius,

θ_n : le n-ième déphasage,

α : la diffusivité thermique du sol en m^2/jr ,

τ : la constante de temps, 365 jours,

t : pas de temps de simulation, en jours.

Étant donné que le modèle archétype est simulé au Québec, Canada, où le climat est froid, le modèle de Xing a été retenu pour représenter la température du sol non perturbé du modèle archétype. En général, on utilise au maximum deux harmoniques, car l'atténuation de l'amplitude est exponentielle avec la profondeur. Ainsi, pour $n > 2$, l'effet des harmoniques supérieures devient négligeable.

1.4.2 Modèles de calcul de la réponse thermique du sol (*g-function*)

EnergyPlus propose deux modèles (U.S. Department of Energy, 2022) qui reposent sur des approximations différentes pour le calcul des fonctions de réponse thermique (appelées '*g-function*', en anglais). Le premier, appelé UHFcalc (*Uniform Heat Flux*), considère des conditions limites de flux thermique uniforme aux parois des forages. En effet, il suppose que tous les forages reçoivent un flux thermique identique et constant tout au long du puits à un instant donné, bien que ce flux puisse varier dans le temps. Le second modèle, UBHWTcalc (*Uniform Borehole Wall Temperature*), suppose une température uniforme à la paroi des forages. Dans ce cas, le flux thermique peut varier d'un forage à l'autre, ainsi que le long de la profondeur de chaque forage. Le calcul des *g*-fonctions avec la méthode de UHFcalc est plus

simple, mais moins précis à long terme pour des champs de puits denses. En effet, ce modèle tend à surestimer le changement de température à long terme (U.S. Department of Energy, 2022). Par conséquent, la méthode de calcul des g-fonction utilisée dans le modèle est la méthode UBHWTcalc.

1.4.3 Modèle de thermopompe air-eau

EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2022) propose un modèle de thermopompe air-eau décentralisée qui comprend un ventilateur avec un fonctionnement ‘marche/arrêt’, un serpentin de chauffage de pompe à chaleur air-eau, un serpentin de refroidissement de pompe à chaleur air-eau et un appoint électrique ou au gaz. Afin de modéliser le serpentin de chauffage et le serpentin de refroidissement, deux approches sont possibles : approche d’ajustement de courbe (*‘Curve-fit model’*) qui considère la pompe à chaleur comme une boîte noire, dont le comportement est simulé à l’aide d’équations paramétrées par des coefficients déterminés à partir des données fournies par le fabricant ou l’approche d’estimation des paramètres (*‘Parameter estimation model’*) qui modélisent chaque composant du système en appliquant les équations de conservation de l’énergie et de la masse. Les principales différences entre ces deux approches résident dans la quantité de données requises et dans leur objectif d’application. L’approche d’ajustement de courbe est plus simple à mettre en œuvre, car elle nécessite uniquement la connaissance des performances de la pompe à chaleur dans les conditions nominales de fonctionnement, des données généralement fournies par les fabricants. En revanche, l’approche d’estimation des paramètres requiert également des données spécifiques relatives aux différents composants de la pompe à chaleur. Ces paramètres proviennent souvent de campagnes de mesures dédiées et ne sont généralement pas communiqués par le fabricant.

Pour ce mémoire, l’approche retenue est l’approche d’ajustement de courbe. Le modèle sélectionné repose sur cinq équations adimensionnelles permettant de prédire les performances de la pompe à chaleur en modes chauffage et refroidissement. La méthodologie consiste à utiliser la méthode des moindres carrés généralisés afin de déterminer un ensemble de coefficients de performance à partir des données fournies dans les catalogues du fabricant pour

des conditions de référence spécifiées. Ces coefficients, associés aux conditions de référence correspondantes, sont ensuite intégrés au modèle pour simuler le comportement de la pompe à chaleur.

Les variables d'entrée influençant les performances de la pompe à chaleur eau-air sont la température d'entrée d'eau du côté charge, $T_{w,in}$, la température sèche et humide d'entrée du côté source, $T_{db,in}$ et $T_{wb,in}$, le débit d'eau du côté source, $\dot{V}_w$, ainsi que le débit d'air du côté charge, $\dot{V}_{air}$. Les équations régissant les modes de chauffage et de refroidissement sont présentées aux équations (1.3) à (1.7).

En chauffage :

$$\frac{Q_h}{Q_{h,ref}} = A_1 + A_2 \cdot \frac{T_{db,in}}{T_{ref}} + A_3 \cdot \frac{T_{w,in}}{T_{ref}} + A_4 \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{air,ref}} + A_5 \cdot \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_{w,ref}} \quad (1.3)$$

$$\frac{P_h}{P_{h,ref}} = B_1 + B_2 \cdot \frac{T_{db,in}}{T_{ref}} + B_3 \cdot \frac{T_{w,in}}{T_{ref}} + B_4 \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{air,ref}} + B_5 \cdot \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_{w,ref}} \quad (1.4)$$

En refroidissement :

$$\frac{Q_{total}}{Q_{total,ref}} = C_1 + C_2 \cdot \frac{T_{wb,in}}{T_{ref}} + C_3 \cdot \frac{T_{w,in}}{T_{ref}} + C_4 \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{air,ref}} + C_5 \cdot \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_{w,ref}} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_{sens}}{Q_{sens,ref}} = & D_1 + D_2 \cdot \frac{T_{db,in}}{T_{ref}} + D_3 \cdot \frac{T_{wb,in}}{T_{ref}} + D_4 \cdot \frac{T_{w,in}}{T_{ref}} + D_5 \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{air,ref}} \\ & + D_6 \cdot \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_{w,ref}} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\frac{P_c}{P_{c,ref}} = E_1 + E_2 \cdot \frac{T_{wb,in}}{T_{ref}} + E_3 \cdot \frac{T_{w,in}}{T_{ref}} + E_4 \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{air,ref}} + E_5 \cdot \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_{w,ref}} \quad (1.7)$$

Supposant un bilan énergétique où toute l'énergie est soit utile (Q_x), soit consommée (P_x), la puissance thermique échangée du côté source en mode chauffage, $Q_{source,h}$, et refroidissement, $Q_{source,c}$, sont calculé respectivement par les équations (1.8) et (1.9):

$$Q_{source,h} = Q_h - P_h \quad (1.8)$$

$$Q_{source,c} = Q_{total} + P_c \quad (1.9)$$

Avec :

$A_X; B_X; C_X; D_X$ et E_X : coefficients d'ajustement pour les modes chauffage et refroidissement.

T_{ref} : température de référence, égale à 283 K (10 °C),

$T_{w,in}$: température d'entrée de l'eau [K],

T_{db} : température d'entrée bulbe sec de l'air [K],

T_{wb} : température d'entrée bulbe humide de l'air [K],

$\dot{V}_{air}$: débit volumique d'air du côté charge [m³/s],

$\dot{V}_w$: débit volumique d'eau du côté source [m³/s],

Q_h : capacité totale de chauffage [W],

Q_{total} : capacité totale de refroidissement [W],

Q_{sens} : capacité de refroidissement sensible [W],

P_h/P_c : puissance électrique consommée en mode chauffage/refroidissement [W],

$Q_{source,h}/Q_{source,c}$: puissance thermique échangée du côté source en mode chauffage/refroidissement [W].

Les variables sont normalisées par les conditions de référence, identifiées par l'indice 'ref'. En mode refroidissement, les conditions de référence (le débit volumique d'air de référence du côté charge ($\dot{V}_{air,ref}$), le débit volumique d'eau de référence du côté source ($\dot{V}_{w,ref}$), la capacité sensible de référence ($Q_{sens,ref}$) et la puissance électrique de référence ($P_{c,ref}$)) correspondent aux conditions de fonctionnement de la pompe à chaleur lorsqu'elle atteint sa capacité de référence ($Q_{total,ref}$), indiquée dans le catalogue du fabricant. La même logique

s'applique en mode chauffage. Dans EnergyPlus, il est nécessaire de spécifier les paramètres aux conditions de référence et de fournir les coefficients d'ajustement de l'équation pour la méthode d'ajustement de courbe (*'Curve-fit model'*). Pour ce faire, EnergyPlus fournit des fichiers Excel *'Parametric Spreadsheets for HeatPump Water-to-Air'* (U.S. Department of Energy, 2021) afin de faciliter la génération des coefficients des équations à partir du catalogue des thermopompes. En effet, une fois le type de pompe à chaleur air-eau sélectionnée, la méthode des moindres carrés généralisés (*generalized least square method*) est utilisée dans le fichier Excel pour la génération des coefficients A_X ; B_X ; C_X ; D_X et E_X à partir des données disponibles dans le catalogue du fabricant. Les coefficients générés sont résumés dans l'Annexe I.

1.5 Rôle du stockage thermique dans un système de PACG

Comme expliqué dans l'introduction, le déséquilibre entre la chaleur injectée dans le sol et celle qui en est extraite peut entraîner une dérive progressive de la température du sol au fil des années d'exploitation. Afin d'atténuer cet effet, une des stratégies utilisées en climat froid consiste à mettre en place un système hybride dans lequel le champ de puits géothermiques est sous-dimensionné vis-à-vis des besoins en chauffage et complété par une source auxiliaire de chauffage permettant de satisfaire le reste de la demande énergétique. Les principales technologies recensées dans la littérature pouvant être couplées aux PACG sont le stockage dans le sol ou la roche (Saleem, Ambreen, & Ugalde-Loo, 2024), le stockage dans l'eau (Saleem et al., 2024), les matériaux à changement de phase (Saleem et al., 2024), et le stockage dans l'enveloppe des bâtiments (Saleem et al., 2024).

Le stockage thermique dans le sol consiste à utiliser le sol comme réservoir d'énergie. Lorsque de la chaleur excédentaire est disponible, par exemple à partir de capteurs solaires, celle-ci est injectée dans le sol. La chaleur stockée est ensuite récupérée par la PACG lors de la saison d'hivernale. Le stockage dans la roche repose sur le même principe, mais utilise des formations rocheuses possédant une capacité de stockage et une conductivité thermique élevées. Les systèmes de stockage dans le sol ou la roche sont fortement dépendants des caractéristiques géologiques du site, telles que la conductivité thermique, la porosité et la teneur en humidité,

qui influencent directement les performances des échanges de chaleur. Leur installation nécessite également le forage de sondes ou l'excavation de tranchées, ce qui peut engendrer des coûts élevés.

Dans les systèmes de stockage thermique dans l'eau (*Tank Thermal Energy Storage*, ou TTES en anglais), l'énergie est stockée dans un réservoir d'eau. Les systèmes PTES (*Pit Thermal Energy Storage*, en anglais) fonctionnent de manière similaire, mais utilisent une fosse remplie d'eau, permettant ainsi de stocker des quantités d'énergie plus importantes. Les systèmes de stockage dans l'eau, tels que les réservoirs thermiques (TTES) et les fosses de stockage (PTES), offrent une grande capacité de stockage, mais lorsque les besoins de stockage sont importants, le volume du réservoir et les coûts associés augmentent rapidement. Les TTES sont principalement limités par leurs coûts de construction et d'isolation, tandis que les PTES requièrent de grandes superficies de terrain, ce qui peut restreindre leur implantation dans les zones densément urbanisées.

Le stockage dans les aquifères souterrains (ATES) utilise une nappe phréatique comme réservoir thermique. Pendant la phase de stockage (saison d'été), l'eau souterraine froide est extraite et elle sert à refroidir le bâtiment. Cette eau réchauffée est ensuite réinjectée dans le puits chaud. Lors de la phase de récupération (saison d'hiver), cette eau chaude stockée est pompée pour alimenter la PACG et l'eau refroidie est réinjectée dans le puits froid. Le principal inconvénient de l'ATES est la forte dépendance aux conditions géologiques locales, dont la connaissance limitée freine son adoption généralisée. Les systèmes de stockage dans les aquifères (ATES) sont quant à eux limités par la disponibilité d'une nappe souterraine adaptée, la qualité de l'eau ainsi que les contraintes réglementaires et environnementales associées à leur exploitation.

Enfin, le stockage dans l'enveloppe du bâtiment exploite la capacité thermique des matériaux de construction, tels que les murs et les dalles de béton. Ces éléments absorbent la chaleur lorsqu'elle est disponible et la restituent progressivement lorsque les besoins augmentent. Cette technique présente une capacité de stockage plus faible que les autres technologies et demeure principalement adaptée au stockage de courte durée. Elle est principalement adaptée aux bâtiments dont la masse thermique est intégrée dès la conception. Dans les bâtiments

existants, son application est plus limitée puisqu'elle nécessite généralement des modifications des éléments structuraux afin d'augmenter la capacité de stockage thermique (Olsthoorn, Haghighat, Moreau, & Lacroix, 2017).

Toutefois, ces technologies répondent à des objectifs différents de celui poursuivi dans cette étude leur intégration comme système auxiliaire à un système de géothermie dans un bâtiment existant. Dans cette étude, l'objectif n'est pas de réaliser un stockage saisonnier destiné à rééquilibrer les charges du champ géothermique, mais plutôt de disposer d'un système auxiliaire capable de stocker de l'énergie électrique sous forme thermique sur une courte période pour la restituer en période de grands froids sans augmenter puissance appelée pendant les périodes de pointe. Dans ce contexte, le choix s'est porté sur l'accumulateur thermique centralisé (ATC), présenté dans l'introduction, en raison de sa compacité et simplicité d'intégration dans une boucle de chauffage et de sa compatibilité avec une alimentation électrique. Ce type de système permet de stocker l'énergie thermique produite à partir d'électricité, notamment en période de faible demande ou en heures creuses, afin de la restituer ultérieurement pour le chauffage. De plus, pour une même capacité de stockage thermique, un réservoir d'eau chaude conventionnel requiert un volume 3.4 fois plus important qu'un ATC d'où le choix de cet appareil de stockage dans cette étude. En effet, le modèle d'ATC utilisée dans ce projet peut stocker une énergie de 440 kWh pour un volume de 2.8 m³ (2.49m x 1.3m x 0.863m) (Steffes Corporation). Si on cherche le volume d'eau capable de stocker cette même énergie, pour un réservoir d'eau qui fonctionne entre 40°C et 80°C, le volume d'eau requis serait de 9.48 m³.

Étant donné que le système étudié repose principalement sur les PACG comme source de chauffage et de refroidissement, certaines stratégies de gestion de la demande, telle que le déplacement de pointe, ne peuvent pas être appliquées directement à ces équipements. En effet, les PACG ne constituent pas des systèmes de stockage d'énergie. Par conséquent, appliquer une stratégie de déplacement de pointe reviendrait à interrompre leur fonctionnement durant les périodes de forte demande, ce qui entraînerait une absence de chauffage ou de climatisation, et donc une situation non réaliste et non acceptable pour le confort des occupants.

Dans ce contexte, la stratégie retenue est celle du nivelage de la demande, qui consiste à limiter les appels de puissance en période de pointe en interrompant la consommation électrique de l'ATC, sans affecter le fonctionnement des PACG. Un seuil de puissance est ainsi défini pour l'ATC afin de contrôler son fonctionnement et d'éviter les pics de consommation électrique, tout en garantissant que les besoins en chauffage et en refroidissement des bâtiments soient assurés par les PACG. Conséquemment, une tarification qui pénalise la consommation durant les périodes de pointe, comme les tarifs Flex d'Hydro-Québec, n'est pas adaptée, seul le tarif M a été retenu pour cette étude.

1.6 Vérification des modèle archétypes du parc scolaire québécois

Conformément à la directive ASHRAE Guideline 14, un modèle est considéré comme bien calibré lorsque les indicateurs CV(RMSE) et NMBE respectent des seuils prédéfinis. Toutefois, ces critères ne s'appliquent pas directement à un modèle archétype, puisque la directive établit ces seuils de validation pour un modèle représentant un bâtiment unique, et non un parc immobilier. Il est donc nécessaire d'investiguer les pratiques rapportées dans la littérature afin de déterminer les indicateurs appropriés pour confirmer la représentativité du modèle archétype développé.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de confirmer les résultats du modèle archétype afin de pouvoir y intégrer un système de stockage thermique et d'évaluer différents scénarios d'exploitation. Afin de valider les résultats de la consommation et d'appel de puissance du modèle, il est nécessaire de comparer ses résultats à ceux des écoles de référence. Cette confirmation comporte donc deux volets : le premier vise à valider la consommation énergétique du modèle, tandis que le second porte sur la représentativité de la pointe électrique, notamment son moment d'occurrence, sa durée et son amplitude. On révisé donc les approches utilisées dans la littérature pour confirmer les résultats d'un modèle archétype. Pour Sokol, Cerezo Davila, et Reinhart (2017), la validation a été réalisée en comparant les consommations énergétiques simulées aux consommations réelles mesurées pour les bâtiments résidentiels de Cambridge. Un ensemble de 2 263 bâtiments distincts ont ensuite constitué l'échantillon de test afin de vérifier la capacité de généralisation des résultats. Les consommations simulées et

mesurées ont été normalisées par la superficie de plancher afin d'obtenir l'intensité énergétique (IÉ), exprimée en kWh/m². L'écart entre les valeurs simulées et mesurées de l'IÉ annuelle a été quantifié à l'aide de l'erreur en pourcentage, tandis que l'écart entre les valeurs mensuelles a été évalué à l'aide du CV(RMSE). En ce qui concerne M. Bernier, A. Neale, et M. Kummert (2024), la validation des archétypes repose principalement sur leur capacité à reproduire les caractéristiques énergétiques du parc résidentiel de référence. Deux indicateurs principaux sont considérés : la consommation énergétique annuelle en kWh qui permet d'évaluer la représentativité de l'archétype en termes de consommation globale et la demande électrique de pointe en kW qui permet de vérifier sa capacité à reproduire les périodes de forte sollicitation du réseau électrique. La demande de pointe est évaluée à partir des 200 valeurs de charge électrique les plus élevées de l'année ainsi qu'au moment de la pointe du réseau d'Hydro-Québec. La validation des archétypes de Mattsson, Danielski, Olofsson, et Nair (2025) repose sur les indicateurs CV(RMSE) et NMBE calculés à partir des consommations énergétiques mensuelles pour la calibration et journalières pour la validation conformément aux critères de la directive ASHRAE Guideline 14. Il est important de noter que dans cette étude la validation est considérée acceptable seulement sous certaines conditions, notamment en excluant les périodes de faible demande énergétique. Sansregret et Millette (2009) et Vanroy (2024) ont utilisés l'indicateur d'IÉ annuelle pour valider les résultats des archétypes scolaires.

Conformément aux approches retenues dans la littérature, l'intensité énergétique (IÉ) annuelle a été choisie comme indicateur pour confirmer les résultats du modèle archétype à partir des écoles de référence³. L'IÉ annuelle est calculée en divisant la consommation énergétique annuelle du bâtiment par sa superficie de plancher. De plus, la puissance annuelle maximale normalisée par la superficie est retenue dans le cadre de cette étude.

³ Malgré que 7 écoles de références soient disponibles et documentées, les données énergétiques de seulement 6 d'entre elles seront retenues pour vérifier le comportement énergétique adéquat du modèle. Les raisons de l'exclusion de l'école S7 seront présentées en détails au chapitre 5.

Toutefois, ces indicateurs annuels ne suffisent pas à eux seuls pour confirmer la représentativité du modèle. Puisque la géothermie est utilisée à la fois pour le chauffage et la climatisation, il est essentiel de s'assurer que la charge de climatisation, servant au dimensionnement du champ géothermique avec système auxiliaire, n'est pas surestimée par rapport aux écoles de référence. Une confirmation de la consommation énergétique mensuelle et de la puissance maximale mensuelle est donc également réalisée pour les mois d'été.

Enfin, au-delà des validations annuelles et mensuelles, le profil journalier fait l'objet d'un ajustement afin de reproduire adéquatement le moment d'occurrence, la durée et l'amplitude des pointes de puissance. Une partie des résultats de cette démarche est présentée au chapitre 4, tandis que les analyses complémentaires sont discutées au chapitre 5.

CHAPITRE 2

Méthodologie globale

Cette section détaille la méthodologie globale mise en œuvre dans ce mémoire afin d'atteindre l'objectif principal : évaluer le potentiel du couplage de l'accumulateur thermique centrale (ATC) hydronique avec un système géothermique. Cette démarche se divise en trois étapes distinctes, alignées avec les sous-objectifs du projet de recherche.

Dans un premier temps, une collecte des données est réalisée afin de répertorier et d'analyser les sites existants où un couplage ATC-géothermie a été déployé. Par la suite, un modèle archétype représentatif de ces établissements scolaires est développé à l'aide du logiciel de modélisation énergétique OpenStudio via son moteur de calcul EnergyPlus. Par la suite, il est nécessaire de s'assurer que le modèle reproduit adéquatement le comportement énergétique des sites, tel qu'expliqué à la section 1.2. Enfin, ce modèle numérique est utilisé pour simuler différentes configurations de système CVCA sous la forme de scénarios. Ces scénarios sont évalués et comparés selon deux indicateurs: un indicateur économique et un indicateur d'appel de puissance. Cette dernière étape a fait l'objet d'un article de conférence présenté lors de la conférence eSim en juin 2026. Les deux prochaines sous-sections résument les étapes méthodologiques utilisées afin de répondre à chacun des sous-objectifs.

2.1 Développement du modèle archétype

La méthodologie utilisée pour développer le modèle archétype comporte trois étapes principales :

- 1) Recenser les méthodes de création d'archétypes présentes dans la littérature et les données du parc scolaire québécois, puis les convertir en un ensemble de critères opérationnels. Ce cadre permet de fixer les règles qui guideront la structure de l'archétype.
- 2) Extraire et analyser les données géométriques et les configurations des systèmes CVCA de chacune des écoles de référence. Cette collecte s'effectue en conformité avec les critères établis à l'étape 1.

3) Développer le modèle EnergyPlus/OpenStudio représentant l'archétype défini précédemment.

2.2 Comparaison de la performance du couplage ATC-géothermie aux scénarios simulé

L'article de conférence intitulé « *Potential of electric thermal storage as auxiliary to ground coupled heat pump system* » compare le profil de l'archétype au profil électrique des 3 écoles de références dont on possède les données de consommation électrique horaire. Des ajustements sont faits pour assurer que le profil de l'archétype représente adéquatement le comportement énergétique des écoles de référence. Après avoir confirmé la représentativité du modèle, trois scénarios sont testés soient : 1) Un système 100 % géothermique dont le dimensionnement est basé sur les charges de chauffage nominales du bâtiment; 2) Un système de géothermie dimensionné selon les charges de climatisation nominales et couplé à un ATC; 3) Un système dimensionné tel que le scénario 2, mais avec une chaudière électrique utilisée comme auxiliaire à la place de l'ATC. Ces scénarios sont évalués selon deux indicateurs de performance. Le premier est l'appel de puissance, visant à mesurer la capacité du couplage à limiter la pointe de demande sur le réseau électrique par rapport à un appoint électrique classique. Le second est un critère économique évaluant la réduction des coûts sur la facture énergétique.

CHAPITRE 3

Développement du modèle archétype

En 2020, une équipe de recherche composée d'étudiants-chercheurs du laboratoire de thermique et de science du bâtiment (LTSB) de l'École de Technologie Supérieure a réalisé un inventaire afin d'établir un état des lieux de l'utilisation du stockage thermique dans les bâtiments institutionnels au Québec. Pour la collecte de données, trois outils ont été utilisés (Ido, 2020):

- **La Banque des Immeubles des Commissions Scolaires (BICS)** : répertorie les principales caractéristiques des bâtiments des commissions scolaires, notamment le code-bâtiment, le nom, l'adresse, la superficie, l'usage, ainsi que leur localisation.
- **Le Système Informatisé de Maintien d'Actifs des Commissions Scolaires (SIMACS)** : un outil de gestion et d'aide à la décision qui centralise, pour chaque bâtiment, des informations telles que l'année de construction, l'emplacement, la catégorie, les caractéristiques des systèmes CVCA et électriques, ainsi que celles du stockage thermique (technologie utilisée, année de mise en service, etc.), en plus des travaux de réfection et de leurs coûts.
- **Hélios** : un logiciel de gestion énergétique qui fournit des données détaillées sur la consommation énergétique des bâtiments, incluant les factures énergétiques, les sources d'énergie utilisées, la tarification, l'appel de puissance et l'énergie consommée.

Un couplage d'ATC comme source auxiliaire à la géothermie a été recensé (Ido, 2020) dans 7 écoles primaires au Québec, soient :

- L'école S1*, du CSS Trois-Lacs ;
- L'école S2*, du CSS Trois-Lacs ;
- L'école S3*, du CSS Trois-Lacs.
- L'école S4, du CSS des Mille-Îles ;
- L'école S5, du CSS des Mille-Îles ;
- L'école S6, du CSS des Mille-Îles, et

- L'école S7, du CSS du Fer.

3.1 Écoles de référence

L'archétype visé doit représenter les écoles de référence où se trouve un couplage d'un système géothermique avec l'accumulateur thermique électrique. Le Tableau 3.1 résume les caractéristiques géométriques des 7 écoles de référence ayant un tel couplage, telles que rapportées dans le mémoire d'Ido (2020).

Tableau 3.1 Caractéristiques géométriques des 7 écoles de référence

CSS	des Trois Lacs			des Mille-Îles			du Fer
École	S1*	S2*	S3*	S4	S5	S6	S7
Forme	L	L	L	L	L	T	L
Superficie totale [m ²]	4277	4380	4885	5192	4885	5478	3210
Année de construction	2013	2011	2011	2017	1961	1998	2012
Taux fenêtre-mur [%]	N/A	N/A	37%	N/A	N/A	32%	30%
Compacité relative	N/A	N/A	0.7	N/A	N/A	0.8	0.64
Nombre d'étages	2						
Forme du toit	Toit plat						

En se basant sur les caractéristiques des 7 écoles documentées précédemment, on identifie la géométrie de l'archétype.

3.2 Géométrie du modèle archétype

La majorité des écoles de référence sont de construction récente (après 2010), ont une forme en L, deux étages, un corridor central et un toit plat. La superficie totale de la plupart des écoles de référence est entre 3000 et 5500 m². L'archétype devrait représenter une école primaire récente (construction conforme au Code de construction de 2011), de forme en L, avec deux étages, un corridor central, un toit plat et d'une superficie totale de l'ordre de 4000 m². D'après la revue de la littérature portant sur les modèles archétypes du parc scolaire, aucun des modèles existants ne correspond aux caractéristiques recherchées. Il est donc nécessaire de développer un nouvel archétype capable de représenter adéquatement les sept écoles de référence.

La Figure 3.1 illustre la géométrie du modèle archétype développé.

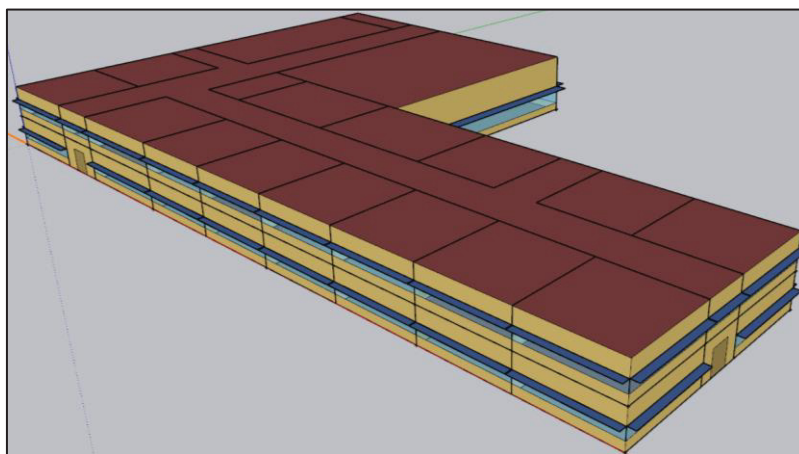


Figure 3.1 Géométrie du modèle archétype

La revue de littérature sur les archétypes représentant le parc scolaire québécois ne permet pas d'identifier la manière dont les espaces intérieurs de ces archétypes sont structurés et organisés. Il était entre autres impossible d'identifier les principes et les critères qui ont guidé l'organisation spatiale choisie par les différents auteurs, ou les références ou méthodologies sur lesquelles leurs choix finaux étaient fondés. Pour le développement de l'archétype, nous nous sommes attardés sur les écoles ayant une forme en L et pour lesquelles nous disposons les plans architecturaux. On distingue 5 des 7 sites étudiés qui ont la forme L : S1*, S2*, S3*, S4 et S7. On possède le plan architectural de seulement les écoles S3* et S7. L'analyse de ces

plans permet de constater que celles-ci se ressemblent dans leur répartition spatiale. Par conséquent, ces deux écoles sont les deux références choisies pour identifier l'organisation spatiale de l'archétype. Les principaux espaces devant y figurer sont détaillés ci-dessous.

La **salle de classe** présente l'élément fondamental dans l'architecture des écoles primaires. Selon le MELS (Direction de l'accès à l'information, 2025a), une salle de classe primaire doit avoir une superficie entre 50 à 72 m² et peut accueillir entre 18 à 29 élèves. Une classe maternelle doit avoir une superficie entre 60 à 70 m² et peut accueillir entre 15 à 20 élèves.

Le **gymnase** est un élément particulièrement important dans la structure spatiale des écoles, puisqu'il pose des contraintes du point de vue de ses dimensions et sa largeur. Selon le MELS, la superficie minimale d'un gymnase simple dans une école primaire est de 216 m² (18 x 12 m) et d'une hauteur minimale de 5.5 m (DAA Stratégies firme, 2013). Le Tableau 3.2 montre la superficie du gymnase de 11 écoles au Québec pour lesquels nous avons eu accès aux plans architecturaux, tirés de (Ido, 2020).

Tableau 3.2 Caractéristiques des gymnases dans 11 écoles du Québec

Site	Année de construction	Superficie totale (m ²)	Nombre d'élèves (Direction de l'accès à l'information et des plaintes Québec, 2023)	Gymnase	
				(m ²)	(%)
S3*	2011	4885	467	216 (18x12)	5
S7	2012	3210	614	432 (24x18)	14
É1	1952	1438	280	235	16
É2	1951	4201	394	378	9
É3	1971	4402	454	225	5
É4	1971	3904	355	521	13
É5	1956	3600	412	222	6
É6	1951	7742	822	796	10
É7	1957	5786	234	377	7
É8	1957	3303	282	216	7
É9	1962	2356	168	437	19

Afin d'identifier une corrélation entre la superficie du gymnase et les autres variables mentionnées dans le Tableau 3.2, on utilise le coefficient de corrélation de Pearson, r , donné par l'équation (3.1).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.1)$$

Avec :

r : Coefficient de corrélation de Pearson ; $-1 \leq r \leq 1$

X_i : Valeurs de la variable X dans l'échantillon

$\bar{X}$: Moyenne des valeurs de la variable X dans l'échantillon

Y_i : Valeurs de la variable Y dans l'échantillon

$\bar{Y}$: Moyenne des valeurs de la variable Y dans l'échantillon

Selon la valeur de r , on peut en déduire la corrélation entre les variables. En effet, si r est proche de 1, alors les variables sont dépendantes linéairement positivement. Si r est proche de 0, alors il n'y a aucune relation linéaire entre les variables. Si r est proche de -1, alors les variables sont dépendantes et linéairement négativement.

Si on trace la superficie du gymnase en fonction de l'année de construction, la superficie totale et le nombre d'élèves, on constate sur la Figure 3.2 une valeur aberrante par rapport aux autres sites (l'école É6 encerclée en rouge), ce site est retiré de l'analyse.

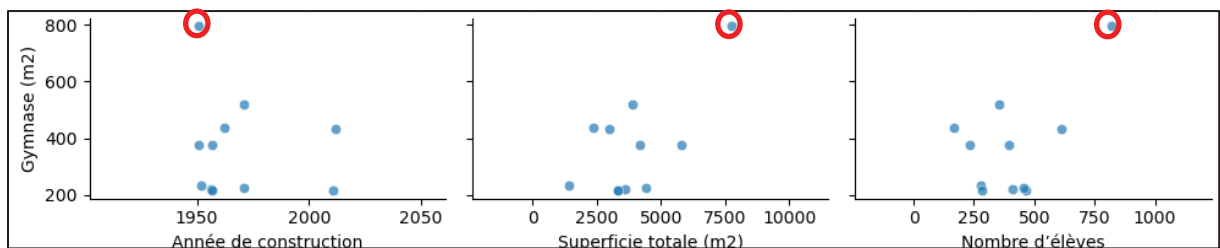


Figure 3.2 Comparaison entre la superficie des gymnases et l'année de construction, la superficie totale, et le nombre d'élèves

D'après la Figure 3.3, le coefficient de corrélation de Pearson r est inférieur à 0,5 dans les trois cas, indiquant une faible corrélation entre les paramètres. Cependant, il convient de noter que l'échantillon utilisé n'est pas suffisamment représentatif. On pourrait notamment s'attendre à ce que la superficie du gymnase soit positivement corrélée au nombre d'élèves, puisque les exigences de conception des établissements scolaires québécois tiennent compte de la capacité d'accueil de l'école dans la détermination des besoins en espaces fonctionnels (Direction de l'accès à l'information, 2025a). Toutefois, le coefficient de corrélation obtenu entre ces deux variables est négatif ($r = -0.08$), ce qui ne correspond pas à la relation attendue selon ces critères de conception.

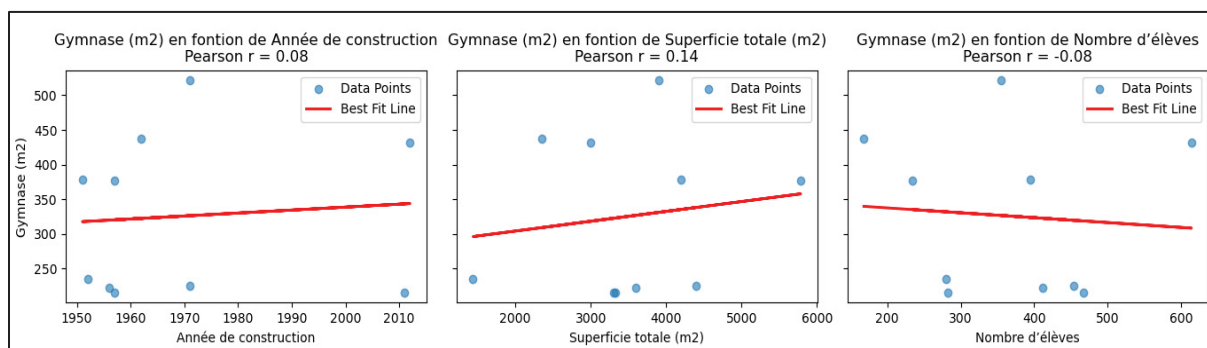


Figure 3.3 Coefficient de corrélation de Pearson pour la superficie du gymnase en fonction de l'année de construction, la superficie totale, et le nombre d'élèves

L'archétype d'école de taille moyenne développé pour Archétype Québec (ArchQC 2) présente un gymnase de superficie 450 m² (25 x 18) qui occupe 22% de la superficie totale du modèle. Selon la Direction générale du financement et de l'équipement et la Direction de l'équipement scolaire, on peut estimer la superficie du gymnase selon le nombre de groupes présents dans l'école. Ainsi, une école comptant 13 groupes ou moins nécessite 1 plateau (18 x 12m). Pour les écoles ayant entre 14 et 25 groupes, il est nécessaire de disposer de 2 plateaux (24 x 18m) afin d'assurer une capacité suffisante pour les activités physiques. Enfin, les établissements comptant entre 26 et 38 groupes doivent prévoir 3 plateaux pour accueillir tous les élèves de manière adéquate. Pour l'archétype, on prévoit avoir 19 classes du primaire, 3 classes de maternelle et 1 salle polyvalente et une salle de musique, soit 19 groupes, ce qui nécessiterait l'équivalent de deux plateaux. Supposant chaque plateau ayant la superficie minimale exigée

par le MELs, soit 216 m², les deux plateaux occuperaient 432 m². Par conséquent, pour 19 groupes, le gymnase aura une superficie de 432 m² (24 x 18 m).

Le Tableau 3.3 présente le pourcentage d'occupation des espaces dans les écoles primaires, ainsi que les superficies correspondantes, selon le Projet Schola, la base de données SIMEB, les archétypes de Vanroy (ArchQC 1 et ArchQC 2), et les écoles S3* et S7. L'ArchQC 3 n'est pas présenté, puisqu'il représente une école secondaire.

Tableau 3.3 Pourcentage des espaces occupés dans l'archétype et ceux des espaces occupés dans les écoles primaires

	Archétype		Schola	SIMEB	ArchQc 1 Vanroy (2022)		ArchQc 2		S3*		S7	
Espace	m ²	%	%	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
Salle de classe	1594	40	45 à 60	45 à 60	696	42	1248	41	1342	41	1304	44
Gymnase	432	11	19 à 23	23	360	22	450	15	216	7	432	15
Service de garde	-	-	8 à 11	4 à 9	-	-	-	-	-	-	-	-
Biblio.	210	5	3 à 6		-	-	-	-	263	8	91	3
Adm.	234	6	-		72	4	216	7	236	7	139	5
Cafétéria	-	-	-	-	120	7	232	7	-	-	-	-
Toilette	192	5	-	-	44	3	128	4	164	5	128	4
Méc.	192	5		5	40	2	128	4	154	5	121	4
Corridor	985.5	24		15 à 20	290.5	19	600	20	706	22	603	20
Dépôt	140	3	-	-	-	-	-	-	147	5	122	4
Lobby	52.5	1	-	-	17.5	-	48	2	43	1	34	1
Total	4032	100	-	-	1640	100	3050	100	3271	100	2974	100

En se basant sur ces différentes sources, il est possible de développer la géométrie de l'archétype, illustrée aux Figure 3.4 et Figure 3.5. Celui-ci comprend 24 salles de classe d'une superficie moyenne de 66 m² et un gymnase d'une superficie de 432 m², soit 11% de la superficie totale. Étant donné que le gymnase s'étend sur deux étages, la superficie totale de l'archétype est réduite de 4464 m² à 4032 m².

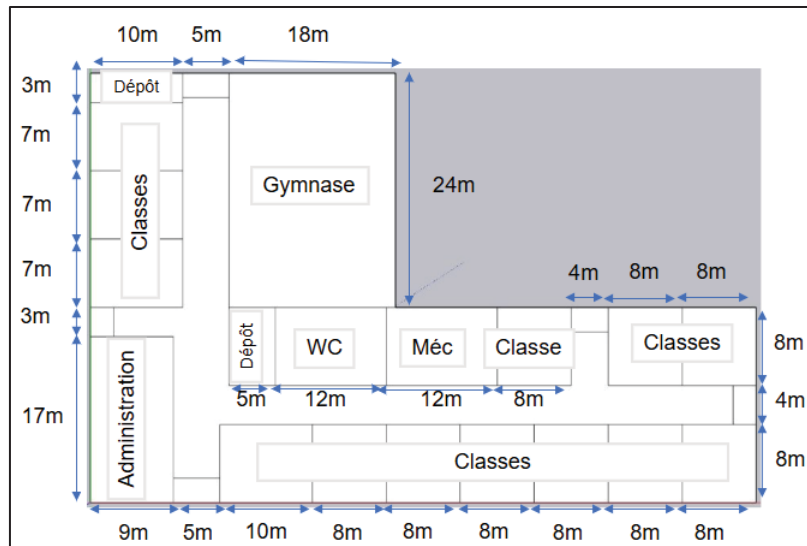


Figure 3.4 Organisation spatiale du rez-de-chaussée de l'archétype

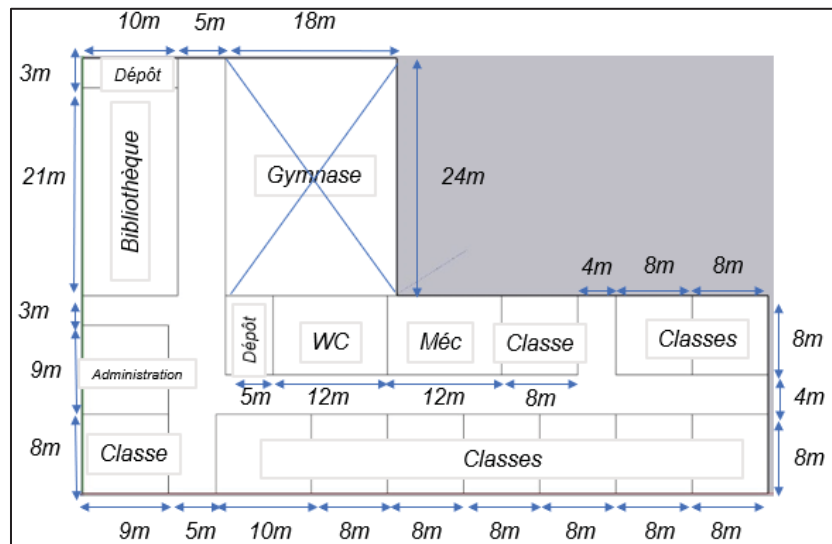


Figure 3.5 Organisation spatiale du 1er étage de l'archétype

3.3 Ensemble de construction

OpenStudio permet de générer des types d'espaces et des ensembles de constructions représentatifs d'une école primaire américaine à l'aide du OpenStudio SketchUp Plug-in. Pour le modèle archétype, nous avons ajusté les valeurs RSI afin qu'elles respectent les exigences minimales du Code National de l'Énergie pour les Bâtiments incluant les modifications pour

le Québec (Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2011) afin de représenter les caractéristiques des écoles de références. Le Tableau 3.4 présente les caractéristiques des parois opaques et les valeurs RSI implémentées dans le modèle archétype. Le Tableau 3.5 présente la valeur U et le SHGC des fenêtres selon CNEB 2011 modifié Québec, également implémentés dans le modèle.

Tableau 3.4 Matériaux de l'ensemble de construction utilisé dans le modèle archétype et leur valeur RSI

Type de paroi	Matériaux de construction	RSI [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]
Toiture	Platelage métallique	5.46
	Isolant de toiture	
Mur extérieur	Stuc, revêtement extérieur	4.05
	Béton lourd, structure	
	Isolant thermique	
	Plaque de plâtre de ½ pouce	
Dalle sur sol	Dalle de béton lourd	1.32
	Sous-tapis / revêtement de sol	
Mur intérieur	Plaques de plâtre	0.16
	Plaques de plâtre	
Plancher intérieur	Dalle de béton normal	0.26
	Sous-tapis	
Porte extérieure non vitrée	Surface métallique	0.85
	Panneau isolant de 25 mm	
Porte intérieure	25 mm bois	0.18

Tableau 3.5 Propriétés de la fenestration utilisée dans le modèle archétype

Type de paroi	Valeur U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]	SHGC [-]
Fenêtre	3.12	0.4

3.4 Horaires et densités

Les horaires d'occupation, de charges aux prises, d'éclairage, d'eau chaude sanitaire, de ventilation, de température de consigne en chauffage et en refroidissement utilisés pour l'archétype sont ceux proposés par le CNEB 2011 tant pour les écoles que les universités, soit l'horaire D (appellation dans le CNEB 2011 modifié Québec) présenté au Tableau 3.6.

[illegible]

Le CNEB 2011 modifié Québec propose également les densités d'occupation, de charge aux prises et d'éclairage dans les écoles primaires, présentées au Tableau 3.7, qui seront employés dans l'archétype.

Tableau 3.7 Densités proposées dans le CNEB 2011 modifié Québec pour les écoles primaires.

Densité	Unité	Valeur
Éclairage	W/m ²	8
Occupation	m ² /occupant	8
Charge aux prises	W/m ²	5
Eau chaude sanitaire	W/occupant	60

Un des sites répertoriés, S4, a été étudié par Morovat (2024) dans son doctorat. Il a documenté que les salles de classe étaient généralement occupées de 6h à 18h. Durant ces heures d'occupation, les températures de consignes variaient entre 20°C et 24°C, lors des heures inoccupées (c.-à-d. 18h à 6h de semaine et toute la fin de semaine), les consignes variaient entre 18°C et 20°C. Après échange avec le CSS Trois-Lacs (C. Hurtubise, Réunion Teams, 09 mai 2025), il s'est avéré que le gymnase de l'école S1* est occupé en soirée pour des activités communautaires entre 18h et 22h et qu'il n'est pas utilisé les fins de semaine. Or, les horaires du CNEB 2011 modifié Québec n'incluent pas d'occupation les soirées et ne correspondent donc pas au profil d'occupation du gymnase. Conséquemment, pour celui-ci, l'horaire d'occupation utilisé est celui d'OpenStudio, adapté selon les détails stipulés par le CSS Trois-Lacs. Les corridors, salles mécaniques, entrées, toilettes et dépôts sont considérés inoccupés en tout temps, donc leur densité d'occupation est 0 W/m² et 0 occupant/m² et leur horaire d'occupation est nul, tous les jours de l'année. Le reste des espaces (c.-à-d. les salles de classe, espaces administratifs et la bibliothèque) sont traités avec les horaires et densité du CNEB 2011 rapportés aux Tableau 3.6 et Tableau 3.7. L'école est considérée inoccupée de la dernière semaine du mois de juin jusqu'à l'avant-dernière semaine du mois d'août, inclusivement. Les horaires d'éclairage intérieur et de charge aux prises proposés par le CNEB 2011 seront utilisés sans modifications.

3.5 Air neuf et évacuation

Les besoins en air neuf et en évacuation pour chaque zone ont été calculés selon la norme American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2022). Seules les toilettes ont des besoins en évacuation pour lesquels on suppose que l’extraction de l’air est compensée par les PACG. Le Tableau 3.8 résume les différents taux d’infiltration utilisés.

Tableau 3.8 Taux de ventilation dans la zone respiratoire selon l’ASHRAE 62.1 2022

Taux de ventilation dans la zone respiratoire (<i>Ventilation Rates in Breathing Zone</i>)									
Espace	Unité	Salle de classe	Biblio	Corridor	Entrée	Adm	Gym	Dépôt	Salle méc
Débit d'air par occupant	m³/s·person	0,005	0,005	0	0,0025	0,002	0,01	0	0
Débit d'air par surface au sol	m³/s·m²	0,0006	0,0006	0,0003	0,0003	0,0003	0,0009	0,0003	0,0005

Tableau 3.9 Taux d’évacuation l’ASHRAE 62.1 2022

Taux d’évacuation (<i>Exhaust Rates</i>)		
Espace	Unité	Toilette
Taux d’évacuation	L/s·unité	25
	m³/s	0,5
	m³/s·m²	0,0104

3.6 Eau chaude sanitaire

À la suite d’un échange avec le CSS Trois-Lacs (C. Hurtubise, Réunion Teams, 09 mai 2025), la capacité et le volume des chauffe-eaux électriques utilisés dans les écoles S1*, S2* et S3* a été répertoriée : il s’agit de deux chauffe-eaux, chacun d’une puissance de 15 kW et d’un volume de 80 gallons pour chaque école. Par conséquent, le modèle archétype est modélisé avec un chauffe-eau modulable de 160 gallons et de 30 kW de capacité. Pour les températures

de consigne pour les chauffe-eaux dans les écoles S1* et S2* sont respectivement 71°C et 60°C. Pour le modèle archétype, on considère la moyenne entre ces deux températures de consigne; soit 66°C. La valeur du débit maximal (*Maximum flow rate* ou *Peak flow rate*) est la valeur suggérée par American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2023) pour les lavabos publics; soit 30 mL/s. L'horaire de l'installation de l'eau chaude sanitaire est conforme à l'horaire proposé par le CNEB 2011 modifié Québec. La Figure 3.6 présente le modèle d'eau chaude sanitaire implémenté.

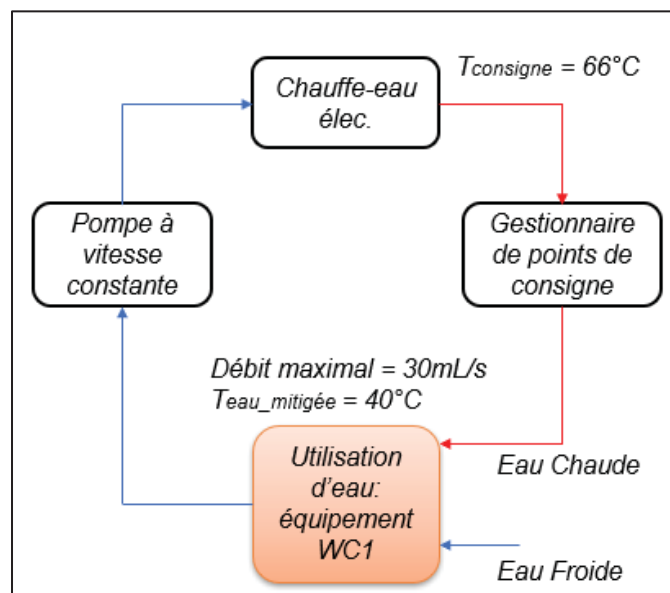


Figure 3.6 Boucle d'eau chaude sanitaire dans le modèle archétype

3.7 Système CVCA

3.7.1 Système CVCA dans les écoles de références

Les plans et devis de ces 7 écoles de références ont été répertoriés par Ido (2020) et nous permettent d'analyser la configuration de leur système de chauffage hydronique. La Figure 3.7 présente un schéma simplifié des systèmes de chauffage des écoles de référence. Tous ces sites ont un système de chauffage hydronique central qui dessert les besoins de chauffage des locaux et l'air extérieur. Tous les sites disposent d'un ATC couplé avec un champ de puits géothermiques. Certains sites possèdent également une source de chauffage supplémentaire,

tels qu'une chaudière ou un système solaire thermique. Dans toutes les écoles, le système géothermique fonctionne en circuit fermé avec un réseau de puits verticaux.

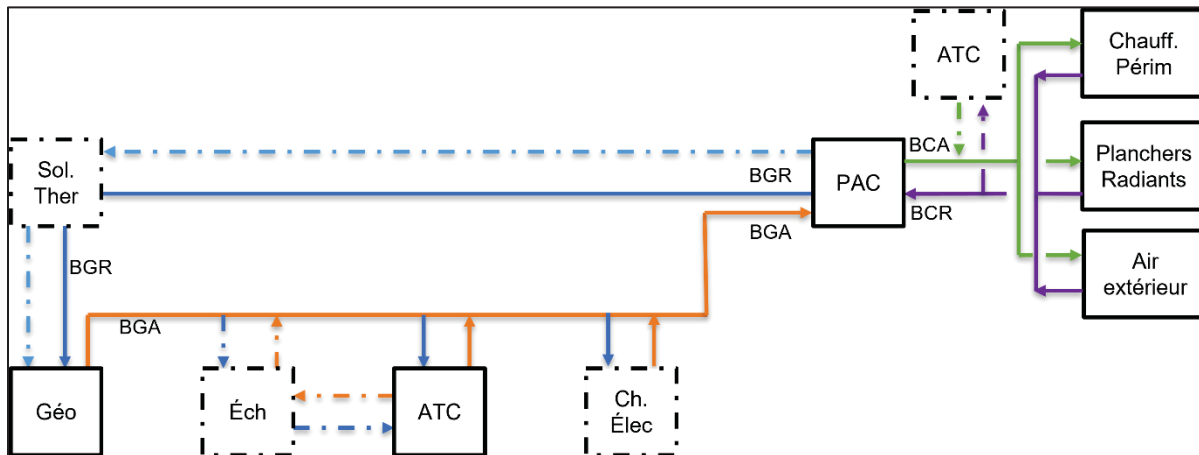


Figure 3.7 Schéma simplifié du système de chauffage répertorié dans les 7 écoles de référence

Or, la configuration des réseaux varie significativement. Certains sites n'ont que des thermopompes eau-air qui utilisent la boucle de géothermie comme source de chaleur pour desservir les besoins des locaux. D'autres sites ont des thermopompes eau-eau créant ainsi une seconde boucle hydronique (ci-après nommée 'boucle de chauffage') opérant souvent à plus haute température. Pour simplifier la discussion, nous allons ci-après nommer 'boucle de chauffage' la partie du réseau hydronique qui serait située du côté 'charge' de thermopompes eau-eau ('BCA' et 'BCR' sur la Figure 3.7). Nous allons référer à la part du réseau hydronique se situant du côté des puits géothermiques et donc du côté 'source' des thermopompes eau-eau par le terme 'boucle géothermique' ('BGA' et 'BGR' sur la Figure 3.7). Les particularités de chaque site sont détaillées ci-dessous.

3.7.2 École S1*

Comme illustré sur la Figure 3.8, l'ATC est installé directement sur la boucle géothermique et le fluide caloporteur (eau glycolée) passe par l'ATC et alimente les pompes à chaleur air-eau, situées dans les salles de classes, l'administration et le gymnase. Les températures apparaissant à la Figure 3.8 représentent les conditions nominales illustrées sur les plans et devis. Ce sont

donc les températures les plus extrêmes attendues lors de la journée de conception hivernale et non pas les températures représentant le mode d'opération usuel.

Dans les conditions nominales, la géothermie opère à très basse température, le fluide caloporteur (eau glycolée) ressort des puits à environ 2.8 °C. Le rôle de l'ATC est alors d'assurer le maintien de cette température minimale en alimentation aux PAC.

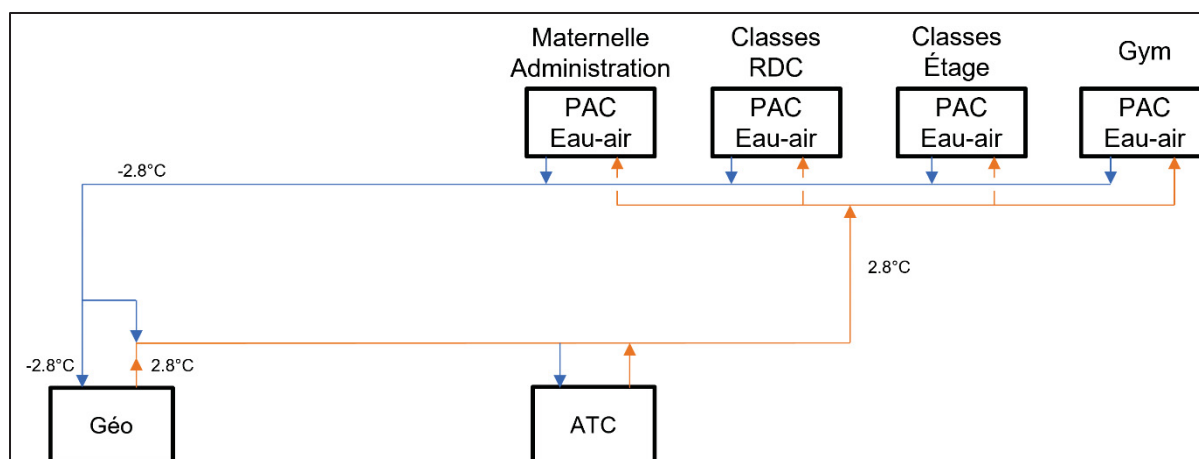


Figure 3.8 Schéma du système de chauffage de l'école S1*

3.7.3 École S2*

Comme indiqué sur la Figure 3.9, l'école S2* utilise du solaire thermique pour préchauffer l'eau glycolée de la boucle de géothermie sur le retour des thermopompes, avant que le fluide ne passe dans les puits. On observe la présence d'un échangeur de chaleur entre la boucle géothermique et l'ATC, ce qui crée deux boucles à des températures différentes. On remarque que la température en sortie du champ de puits est de 2.8 °C dans les conditions nominales. Or, la température d'alimentation indiquée à l'échangeur est de 1.7°C pour ces mêmes conditions sans qu'il n'y ait de source de chaleur entre ces appareils. On comprend qu'ici, l'ATC sert à assurer une température minimale de 2.8 °C aux PAC, même en période de grand froid.

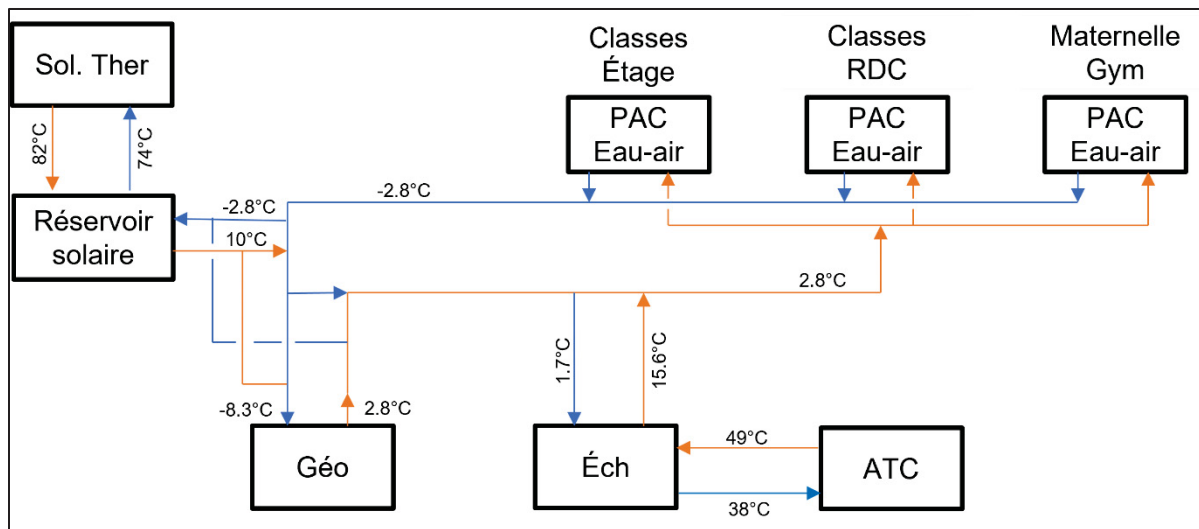


Figure 3.9 Schéma du système de chauffage de l'école S2*

3.7.4 École S3*

La Figure 3.10 présente le système de chauffage de l'école S3*. Cette configuration est similaire à celle de l'école S2*, à l'exception de l'absence d'un système solaire thermique. On observe le même rôle de l'ATC qui est de maintenir la température d'alimentation des PAC de 2.8 °C.

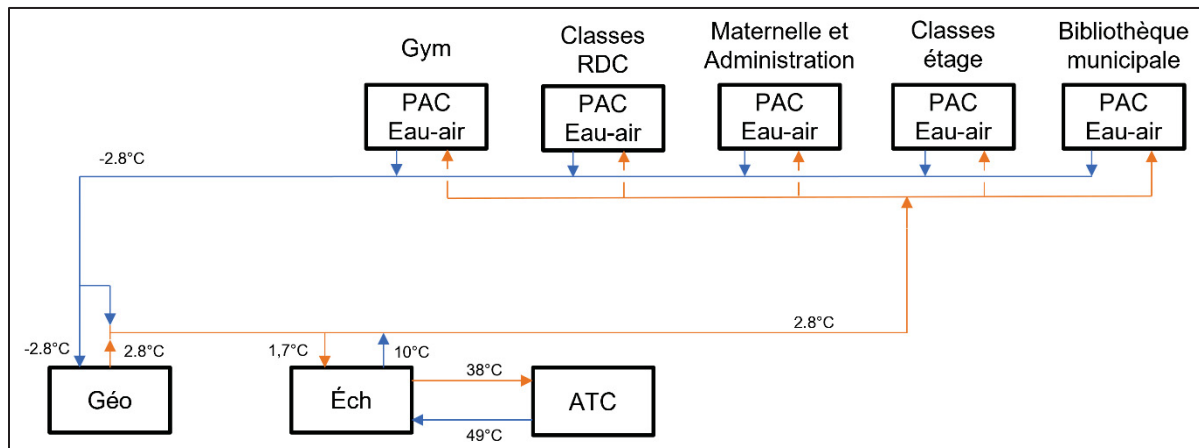


Figure 3.10 Schémas du système de chauffage de l'école S3*

3.7.5 École S4

Pour l'école S4, le système de chauffage est illustré sur la Figure 3.11. En plus des PAC air-eau qui alimentent les salles de classe, les locaux administratifs et le gymnase, une PAC eau-eau assure l'alimentation des planchers chauffants ainsi que des ventilo-convecteurs du gymnase et de l'administration.

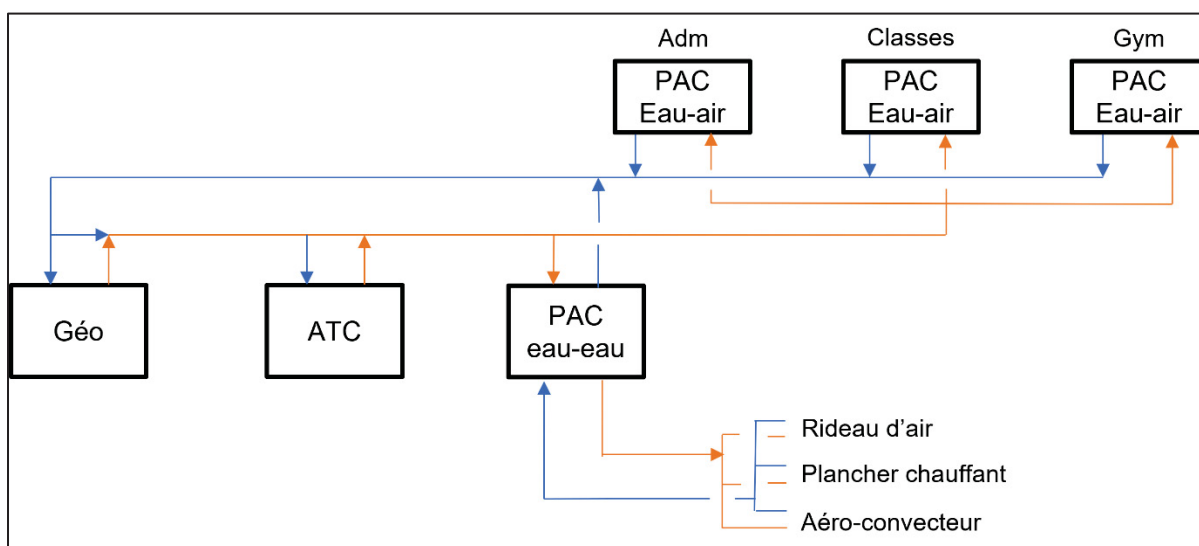


Figure 3.11 Schéma du système de chauffage de l'école S4

3.7.6 École S5

La Figure 3.12 illustre le système de chauffage identifié dans cet établissement. Une thermopompe eau-eau utilise la boucle de géothermie comme source pour produire de l'eau à plus haute température pour chauffer le périmètre avec des radiateurs. L'ATC est installé sur la boucle d'eau chaude plutôt que sur la boucle géothermique.

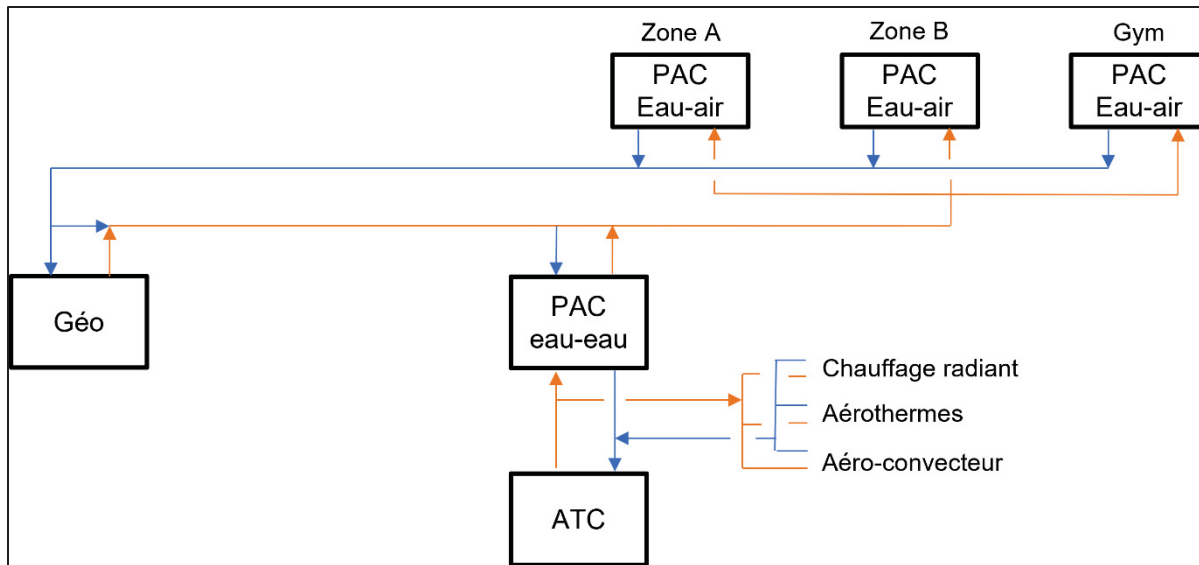


Figure 3.12 Schéma du système de chauffage de l'école S5

3.7.7 École S6

Comme illustré sur la Figure 3.13, l'ATC est installé sur la boucle géothermique, entre les puits géothermiques et les pompes à chaleur. Dans les conditions nominales, le système géothermique fonctionne à très basse température. L'eau glycolée ressort des puits à une température d'environ $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'ATC et la chaudière électrique ont pour rôle de maintenir cette température minimale à l'alimentation des PAC. Deux PAC eau-eau alimentent une boucle de chauffage fonctionnant à des températures de $82.2/71.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin de desservir les planchers chauffants des salles de classe, des locaux administratifs, ainsi que le chauffage périphérique. Par ailleurs, des PAC air-eau, alimentées par la boucle géothermique, assurent le chauffage des locaux administratifs, du gymnase et des salles de classe.

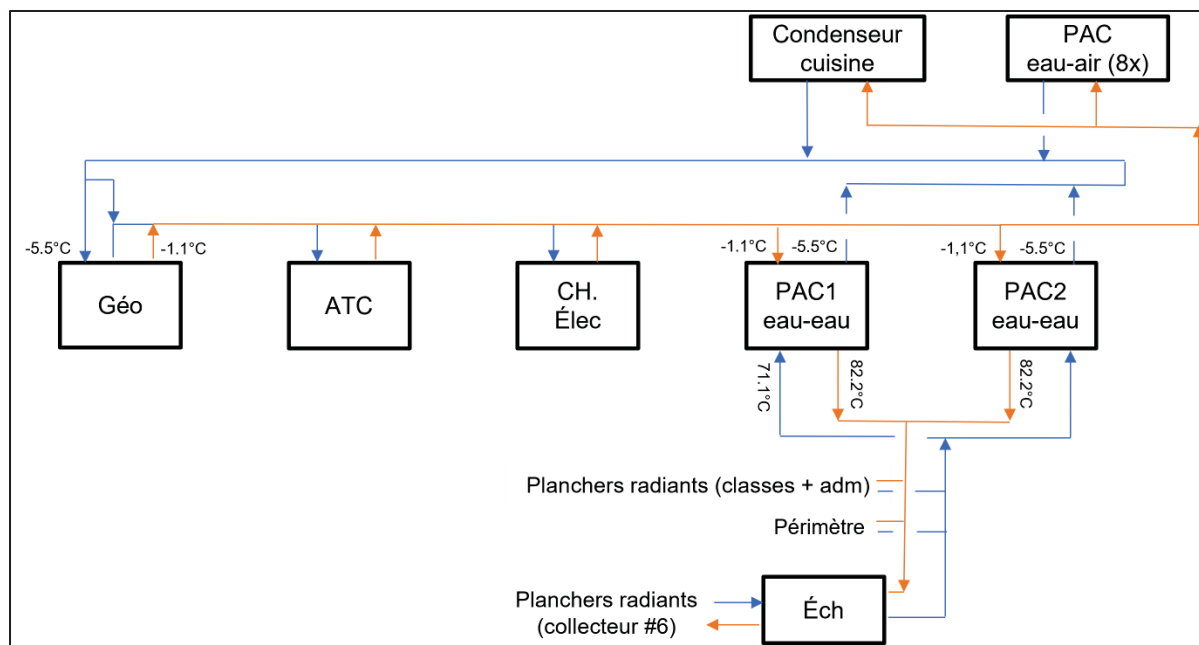


Figure 3.13 Schéma du système de chauffage de l'école S6

3.7.8 École S7

Comme indiqué sur la Figure 3.14, l'école S7 est équipée de deux ATC installés en série sur la boucle géothermique. Un échangeur est également présent entre la boucle géothermique et les ATC, ce qui crée deux circuits fonctionnant à des niveaux de température différents. Dans cette configuration, les ATC ont pour fonction de maintenir une température minimale de 2.8 °C à l'alimentation des PAC, comme dans les écoles S2* et S3*.

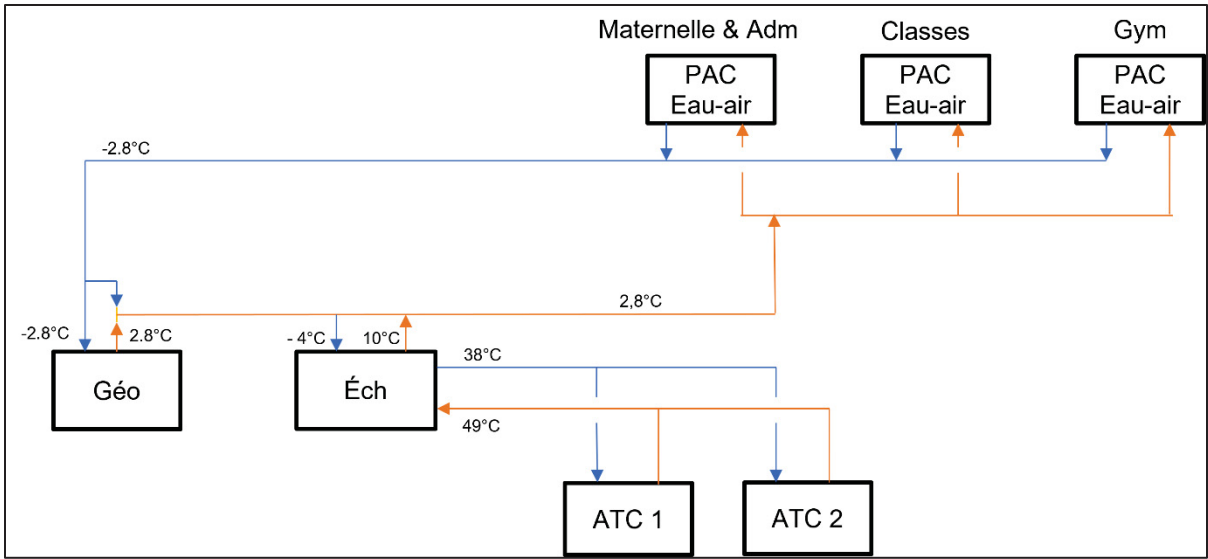


Figure 3.14 Schéma du système de chauffage de l'école S7

Le Tableau 3.10 offre une synthèse de la configuration du système de chauffage des 7 écoles de référence.

Tableau 3.10 Caractéristiques des systèmes de chauffage des 7 écoles de référence

École		S1*	S2*	S3*	S4	S5	S6	S7
Puissance ATC (kW)		80	80	80	80	80	80	80
Nombre d'unité ATC		1	1	1	1	1	1	2
Boucle géothermique ¹	Source	Géo; ATC	Géo; Solaire; ATC via Éch	Géo; ATC via Éch	Géo; ATC	Géo; ATC via TP E-E	Géo; ATC; ChÉ	Géo; ATC via Éch
	Charges	TP E-A	TP E-A	TP E-A	TP E-A; TP E-E	TP E-A	TP E-A; TP E-E	TP E-A
Boucle de chauffage	Source	N/A	N/A	N/A	TP E-E	ATC via TP E-E	TP E-E	N/A
	Charges	N/A	N/A	N/A	Rad	Pér ; Rad; AE	Pér ; AE	N/A

1. Géo : Puits géothermiques ; ATC : Accumulateur thermique central ; ChÉ : Chaudière électrique ; Éch : Échangeur eau-eau ; TP E-E : Thermopompe eau-eau ; TP E-A : Thermopompe eau-air ; AE : Air extérieur ; Rad. : Planchers radiants ; Pér. : Périmètre

D’après le Tableau 3.10, il ressort que la configuration la plus courante parmi les 7 sites étudiés est celle intégrant les puits géothermiques, et un ATC (via un échangeur) sur la boucle

géothermique comme source de chaleur pour des PAC eau-air desservant des locaux (3 sites sur 7). L'école S1* reprend essentiellement cette configuration, mais avec l'ATC directement sur la boucle géothermique. Après investiguer auprès des opérateurs des sites, il n'est pas clair pourquoi certains concepteurs ont choisi de séparer l'ATC de la boucle géothermique par un échangeur et d'autres non. C'est pourquoi la configuration à modéliser est celle de l'école S1*. Un tel modèle pourrait ensuite être modifié pour ajouter un échangeur et créer une seconde boucle opérant à plus haute température.

3.7.9 Système CVCA dans le modèle archétype

Le modèle archétype est en mode chauffage entre le mois d'octobre et le mois d'avril. Il est en mode refroidissement du mois de mai jusqu'avant-dernière semaine du mois de juin et de la dernière semaine du mois d'août à la dernière du mois de septembre. Pour le modèle archétype, nous avons pris l'horaire proposé par le CNEB 2011 modifié Québec pour les installations de chauffage et changé la consigne de chauffage de 22°C à 21°C, qui est la consigne de chauffage documentée dans l'école S4 (Morovat, 2024). Pour le refroidissement, on a opté pour la consigne de température proposée par le CNEB 2011 modifié Québec.

3.7.9.1 Système CVCA

Le système de ventilation du modèle archétype comporte un récupérateur d'énergie d'efficacité sensible et latente de 90 % calculée à partir des plans et devis mécaniques de l'école S1*. Un échange avec le CSS Trois-Lacs (C. Hurtubise, Réunion Teams, 09 mai 2025) a permis d'apprendre que des aérothermes électriques sont utilisés dans les entrées, les dépôts et les salles mécaniques. De plus, les salles de l'administration ont une réchauffe terminale électrique à même les PAC eau-air installées dans les gaines d'air. Ces appareils ont donc été ajoutés au modèle archétype. La Figure 3.15 représente un schéma simplifié du système CVCA implémenté dans le modèle archétype. Il convient de noter que le système implémenté dans l'archétype correspond le mieux aux écoles du CSS Trois-Lacs.

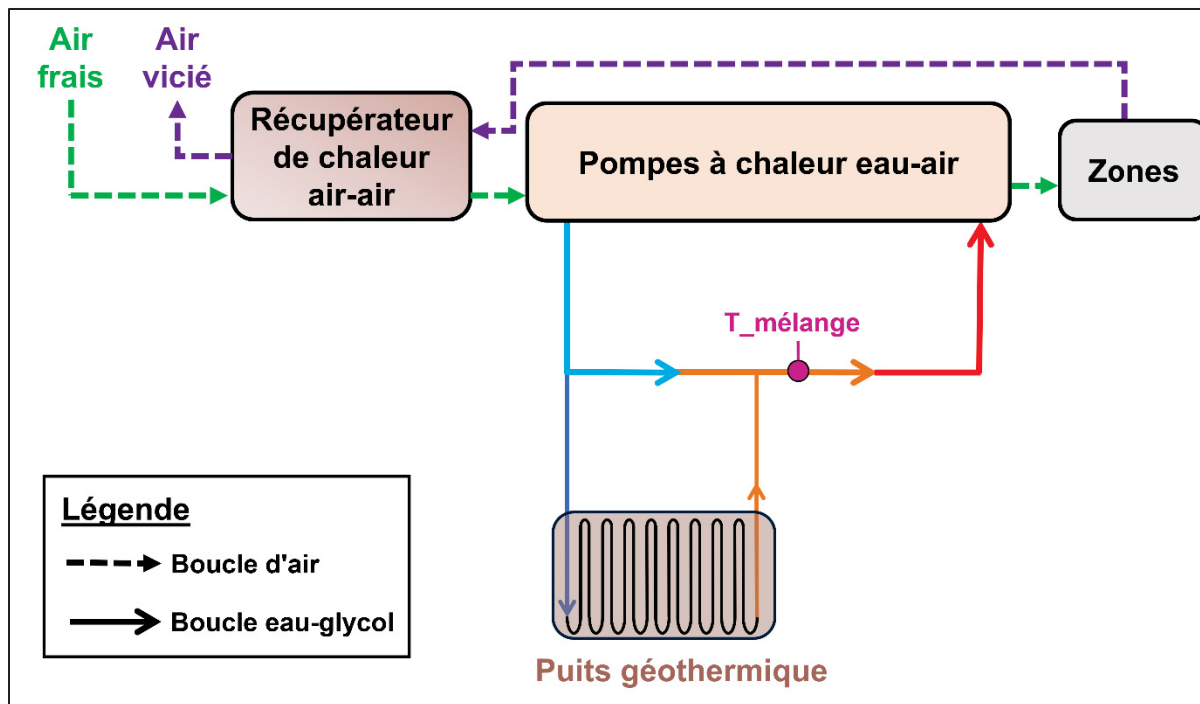


Figure 3.15 Schémas simplifiés de système de CVCA dans l'archétype

CHAPITRE 4

Potential of electric thermal storage as auxiliary to ground coupled heat pump system

Wiem Mootamri ^a, François Laurencelle ^b, Katherine D'Avignon ^a

^a École de technologie supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec) H3C 1K3, Canada

^b Hydro-Québec, 75, boul. René-Lévesque Ouest, Montréal (Québec) H2Z 1A4, Canada

Article de conférence soumis et présenté à la conférence eSim, juin 2026

4.1 Abstract

This paper assesses the potential of using electric thermal storage (ETS) as an auxiliary heater to a vertical ground-coupled heat pump system (GCHPS) with the aim to reduce capital expenditure without increasing operational costs, green house gas emissions, or peak loads. We developed an archetype building model in OpenStudio using characteristics from seven elementary schools across Québec where such a combination of ETS and GCHPS is in operation. Building electric consumption data obtained from the local utility for these schools was compared to the archetype's energy intensity and normalized electric power demand to ensure the archetype's representativity. The archetype was used to simulate a baseline case with a borefield sized for the nominal winter heating load. An existing ETS model, implemented as an OpenStudio Measure, was used to simulate a central hydronic ETS serving as an auxiliary heat source to complement a GCHPS with the reduced number of boreholes needed to supply the nominal summer cooling load.

4.2 Introduction

The decarbonization of space heating represents a major challenge for the building sector in cold climates, as heating loads dominate annual energy consumption. Ground-coupled heat pump systems (GCHPS) have been widely recognized as an efficient solution for reducing

energy use and greenhouse gas emissions (Kharseh, Altorkmany, Al-Khawaja, & Hassani, 2015), as they exploit the relatively stable thermal conditions of the ground, coupled with the high efficiency of heat pumps, to achieve excellent seasonal performance (Liravi et al., 2024). Among the available configurations, vertical ground heat exchangers are commonly adopted in dense urban and institutional contexts. However, in heating-dominated climates, sizing vertical GCHPS based on winter peak demand often imposes unbalanced loads to the grounds, as summer cooling needs are typically significantly lower. These unbalanced loads can be exacerbated in buildings, which undergo prolonged periods of inoccupation during the summertime, such as school buildings. Fully sizing the bore field to meet peak loads can result in excessive drilling depths and high upfront costs, which limits the economic attractiveness of these systems (Gunawan, 2019). To address this issue, hybrid GCHPS configurations are frequently implemented, in which an auxiliary heating system supplies part of the peak thermal demand (Maranghi, 2022). This approach allows for slight bore field under sizing while preserving balanced thermal loads to the ground over the system's lifetime. The use of conventional auxiliary heaters, such as electric or gas-fired boilers, will tend to either increase electricity demand during peak periods or contribute to higher greenhouse gas emissions. Electric thermal storage (ETS), capable of storing heat during off-peak periods and releasing it during peak hours, has gained attention as a demand management solution (Younes, Laurencelle, & D'Avignon, 2024). However, the integration of ETS as an auxiliary heat source in hybrid GCHPS remains insufficiently explored in the literature. The present work aims to address this gap by investigating the potential of ETS as an alternative auxiliary heating solution for vertical GCHPS in cold-climate institutional buildings, through a study of elementary schools in Québec. The results contribute to a better understanding of the tangible benefits this hybrid system can offer to building owners in heating-dominated climates.

4.3 Global methodology

This study was conducted following a three-step methodology. First, the characteristics of seven Québec elementary schools, hereafter labelled the *reference schools*, where such a combination of ETS and GCHPS is in operation, were compiled using various data sources.

An archetype model was defined from this data and built using EnergyPlus/OpenStudio. Second, the baseline archetype electric profile was compared to 15-minute and monthly energy consumption from a subset of the reference schools. Adjustments to schedules were made to improve the match of the electric load profile. Finally, different cases were simulated to identify the effect of the use of ETS as an auxiliary on peak electric loads and calculate the associated energy costs. The coming subsections present the methodology and related results for each of these steps.

4.4 Reference school buildings

Most of the characteristics gathered for the seven reference schools summarized in Tableau 4.1 were obtained from publicly available sources (e.g. Google Maps for building geometry). For all seven reference schools, building operators also provided schematics of the HVAC system. For three of the schools, hereafter labelled *schools** and identified with an asterisk in Tableau 4.1, further information was obtained from building operators, such as architectural drawings, sub-hourly energy use and historical operational data related to the ETS and HVAC systems (ex. control strategies, setpoints, schedules, etc.).

Tableau 4.1 Characteristics of reference schools

ID	S1*	S2*	S3*	S4	S5	S6	S7
Shape	L	L	L	L	L	T	L
Area [m ²]	4277	4380	4885	5192	4885	5478	3210
Weather sta. / HDD	Mtl 4400	Mtl 4400	Mtl 4400	Mtl 4400	Mtl 4400	Mtl 4400	SÎ 6200
Const.	2013	2011	2011	2017	1961	1998	2012
WWR [%]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	32	30
Nb. students	54/377	55/354	92/381	86/432	75/313	91/516	108/375
Nb. classes	21	21	21	21	21	28	32

Tableau 4.1 indicates all but one are of recent build and medium size. Capacity of each school is reported through the number of preschool and elementary students (pre./ele.) (Direction de l'accès à l'information, 2025b) and the number of classes recognized by the Ministry of Education, as reported for the 2024-2025 academic year (Direction de l'accès à l'information, 2025a). They include mainly elementary grade students with some preschool students (< 25%). The schools are in two climate zones (climate zone 6a and 7b) and can be represented through two weather stations: Montréal (Mtl) and Sept-Îles (SÎ) and their number of heating degree days (HDD). All schools were equipped with an HVAC system bearing common characteristics (i.e., GCHPS coupled with ETS and a dedicated outdoor air system (DOAS)) but multiple variants were documented (ex. additional heating loops, location of ETS either on geothermal loop or heating loop, heat delivery equipment type, etc.). Based on the collected data, characteristics of an archetype building were defined, for which further details can be found in Mootamri (2025a) and Mootamri (2025b).

4.5 Archetype description

The archetype building, presented in Figure 4.1, corresponds to an L-shaped, two-storey elementary school, with a total conditioned floor area of 4032 m² and a window-to-wall ratio (WWR) of 32%. Overhangs of 0.64 m are provided for all windows, and the roof has a solar absorptance of 0.7 based on information from building operators. The building geometry and zoning were developed using the OpenStudio SketchUp Plug-in, based on predefined space types and construction sets typical of a U.S. elementary school. While the baseline construction assemblies were preserved, their RSI values were modified to ensure compliance with Québec's adaptation of the National Energy Code for Buildings (NECB) 2011 to align with the average reference school vintage (Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2011).

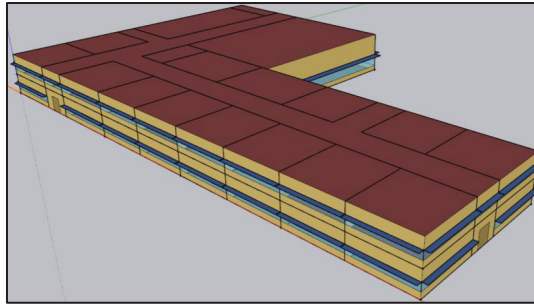


Figure 4.1 Archetype model's geometry

The operational schedules and internal load densities were established in accordance with the NECB-Qc 2011 values for school buildings. Two additional modifications to internal loads were made based on discussions with building operators. Firstly, the building was considered unoccupied from the last week of June to the second-to-last week of August, to match with local educational calendars. Secondly, occupancy densities were set to 0 W/m² for non-occupied spaces (i.e., corridors, mechanical rooms, entrances, washrooms, and storage areas).

4.5.1 HVAC system

The HVAC system retained for the archetype was the one most commonly found amongst the seven reference schools and is presented on Figure 4.2. Heating and cooling of the building zones are provided by water-to-air heat pumps (WAHPs), supplied by a plant loop composed of vertical ground heat exchangers serving as the primary heat source. In the baseline archetype, no ETS was implemented. Ventilation is ensured through a dedicated outdoor air system (DOAS) with heat recovery ventilator (HRV), allowing for the preheating or precooling of outdoor air. Outdoor air ventilation rates were set based on (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022). The 3-way valve controlling flow to the ground heat exchangers was controlled to maximize heat exchange using plant loop temperature setpoints (12 °C in winter and 20 °C in summer season), based on consultations with reference school building operators. The heating season was defined as the period extending from October 1st to April 30th. Each school* was equipped with two electric water heaters, rated at 15 kW, with a storage volume of 364 L. Accordingly, the archetype model represents this configuration using a single equivalent water heater with a total storage capacity

of 727 L and a heating capacity of 30 kW, and domestic hot water temperature setpoint of 66 °C. The maximum water flow rate was defined based on the value recommended by American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2023) for public lavatories, namely 30 mL/s as the archetype includes no showers.

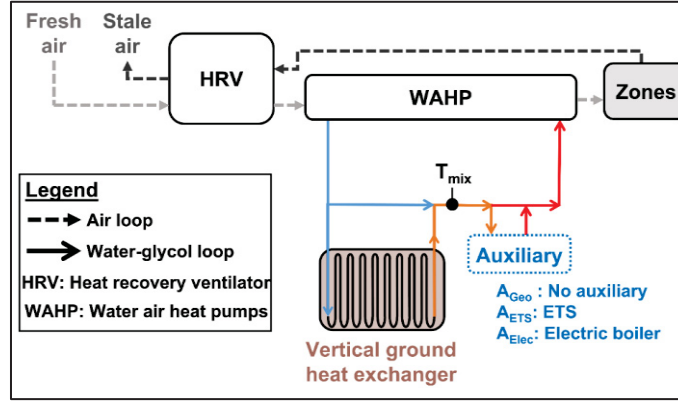


Figure 4.2 HVAC system of the baseline model

4.5.2 Ground loop heat exchanger

Zone heating and cooling loads were generated in OpenStudio under the design days compatible with weather from the Montréal region. The sizing with Sept-Îles design days will not figure in this paper. The resulting heating loads are dominant over cooling loads, with peak loads of 240 kW and 133 kW for heating and cooling respectively. The process described hereafter to size the ground-coupled heat pump (GCHP) system, based on the method proposed in American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2023a), was applied first to the baseline archetype where no ETS was used. The process was further replicated for the alternate scenarios considered with an auxiliary heat source for which further details are provided in the tested cases section.

The design peak thermal load imposed to the ground loop heat exchanger is calculated separately for heating, $Q_{\text{soil-Htg}}$ [W], and cooling, $Q_{\text{soil-Clg}}$ [W], operation modes using Equations (4.1) and (4.2), respectively.

$$Q_{soil,Htg} = \left(\sum Q_{zone,Htg} \right) \cdot \left(\frac{COP_{Htg} - 1}{COP_{Htg}} \right) \cdot fra_{Htg} \quad (4.1)$$

$$Q_{soil,Clg} = \left(\sum Q_{zone,Clg} \right) \cdot \left(\frac{COP_{Clg} + 1}{COP_{Clg}} \right) \quad (4.2)$$

Where $Q_{soil,Htg}$ and $Q_{soil,Clg}$ are the design peak loads to the ground in heating and cooling modes [W], $Q_{zone,Htg}$ and $Q_{zone,Clg}$ represents the sub-hourly space heating and cooling loads of each thermal zone [W], COP_{Htg} and COP_{Clg} are the coefficients of performance of the heat pump in heating and cooling modes, and fra_{Htg} and is the fraction of the heating loads supplied by the ground heat exchanger. In the baseline scenario, no auxiliary heating system is included; thus, the entire thermal demand is met by the geothermal system, and $fra_{Htg} = 1$. As heating is the dominant operating condition in the studied climate, the GCHP system is sized based $Q_{soil,Htg}$ for the baseline archetype. A water–glycol mixture containing 25% glycol by volume is selected as the heat transfer fluid (HTF) circulating within the bore field. The thermophysical properties of the soil, summarized in Tableau 4.2, are derived from a thermal response test report provided by one of the reference schools.

Tableau 4.2 Soil properties

Thermal property	Value
Average ground temperature	9°C
Thermal conductivity	4.17 W/m·K
Thermal diffusivity	0.14 m ² /day
Ground volumetric heat capacity	2650 kJ/(m ³ ·K)

Borehole characteristics extracted from the mechanical drawings of the reference schools are presented in Tableau 4.3. They indicate the use of SDR 11 geothermal pipes with an outer diameter of 42.2 mm and a grout thermal conductivity of 5.112 W/m·K. For the archetype

model, a conservative scenario minimizing the number of boreholes is used, so the design flow rate per borehole, $\dot{V}_{\text{bore}}$, of 0.473 L/s is assumed.

Tableau 4.3 Borehole characteristics

ID	Borehole flow rate [L/s]	Nb. borehole	Borehole depth [m]
S1*	0.473	12	152
S2*	0.454	10	152
S3*	0.424	-	152
S4	-	-	-
S5	-	-	-
S6	0.473	35	76.2
S7	0.434	24	152
Archetype	0.473	-	150

The volumetric flow rate circulating through the geothermal borehole field, $\dot{V}_{\text{tot}}$, is calculated using Equation (4.3).

$$\dot{V}_{\text{tot}} = \frac{Q_{\text{soil,Htg}}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{out,min}} - T_{\text{in,min}})} \quad (4.3)$$

Where ρ and c_p are the density and specific heat capacity of the HTF in the borefield (1031 kg/m³ and 3864 J/kg·K for 25% glycol mixture). $T_{\text{in,min}}$ and $T_{\text{out,min}}$ are the minimum inlet and outlet temperature of the borefield, taken from mechanical drawings to be respectively −2.8 °C and 2.8 °C. $\dot{V}_{\text{tot}}$ is subsequently divided by the $\dot{V}_{\text{bore}}$ to determine the required number of geothermal boreholes, N_{bore} . This sizing approach results in a borehole field composed of 18 boreholes, each with a depth of 150 m, and a total flow rate of 8.04 L/s for the baseline scenario of the archetype model.

The layout of the borehole fields in the various schools was adapted to each building's geometry. For instance, in L-shaped buildings, the borehole field was located in the space enclosed by the L-shape, whereas in T-shaped buildings, the borefield wrapped around the building to exploit the surrounding area. Applying the same approach to the archetype model,

the borehole field was positioned within the available space of the L-shaped layout, resulting in a 6×3 borehole configuration.

4.6 Adjustment of model schedules

As the purpose of this work is to investigate alternative peak demand energy sources (i.e., ETS as GCHP auxiliary), accurate representation of energy use during these key periods is deemed necessary. Internal load profiles (including occupants, lighting and equipment) have been shown to have a significant effect on the peak loads of school buildings (Ouf, Issa, et Merkel (2016) and are amongst the key parameters to adjust in a building model (Sokol et al., 2017) and (Mattsson et al., 2025). As a first step, archetype simulation results are compared against hourly building energy consumption of the schools* for the purposes of occupancy, lighting and plug-load schedule adjustments.

The baseline archetype model was simulated using EnergyPlus Weather (EPW) files from the Montréal (MTL) weather station, for the period matching the historical energy consumption data available for the reference schools. These simulations generated a baseline archetype model, hereafter referred to as A_{MTL} , which was compared to the annual and monthly energy consumption of the subset of reference schools of the matching climate. As the schools* are the only buildings for which 15-minute building energy consumption data is available, comparison of hourly data is done exclusively with these schools. Figure 4.3 presents the simulated and measured electrical load profiles of all cases over a) the weekday of January 30, 2024, and b) the weekend of February 3, 2024.

The comparison reveals two notable load profile differences between the archetype model, A_{MTL} , and the school* buildings (labelled S1*, S2* and S3*). First, Figure 4.3a shows the morning demand peak predicted by the archetype model occurs systematically ~8h, 2 hours later than that observed in the schools S1* through S3*. Second, the archetype model exhibits daytime energy consumption extending into the evening period (17h-22h), behaviour that is absent from the measured school profiles. Figure 4.3b shows the archetype model demonstrates good agreement with the measured school profiles over the weekend period. Additionally, the early evening profile of the school buildings over the weekend, closely resembles their

weekday early evening profile, indicating similar internal loads and schedules are likely in effect.

These observations motivated two key adjustment decisions. First, the archetype model's internal load schedules for the evening periods (17h to 22h) on weekdays were set to the same values as the early evening hours of the weekend schedule to better reproduce the measured behaviour of the schools. Second, the internal load schedule was adjusted to improve morning profile accuracy. Specifically, the onset of the morning load ramp was shifted from 8h to 6h, bringing the simulated profile into closer alignment with the school data. Figure 4.3a shows the simulation results after adjustments of the internal load schedules and demonstrates the improved compatibility between the adjusted archetype model, A_{adj} , and the observed energy use patterns of the schools.

The method used to confirm the representativity of the archetype model is heuristic, as there are no formal guidelines, like the ASHRAE Guideline 14, that define clear criteria or indicators for archetype models.

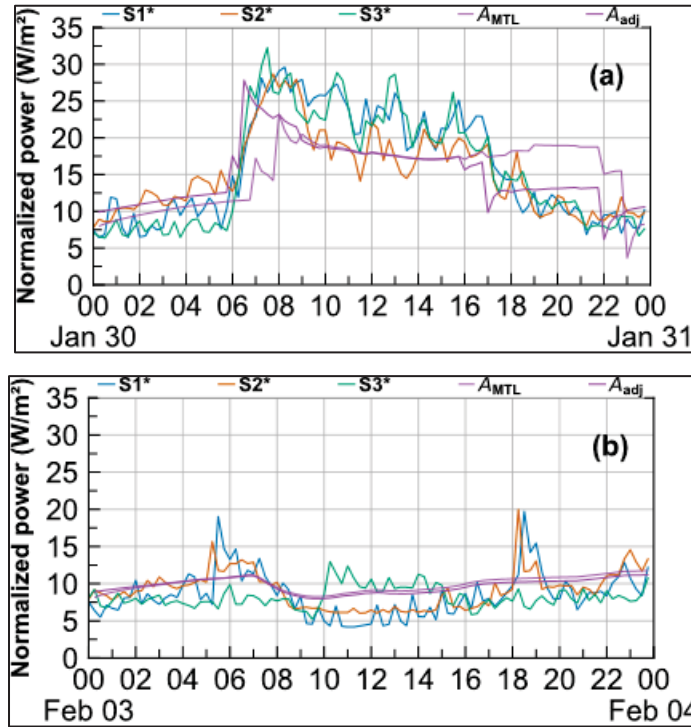


Figure 4.3 Baseline model before and after calibration
a) Weekday (January, 30th) and b) Weekend (February 3rd)

According to American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2023b), a model seeking to represent a specific building is considered validated when CV(RMSE) and NMBE of monthly energy consumption are below 15% and $\pm 5\%$, respectively. For hourly energy consumption, acceptable values correspond to a CV(RMSE) below 30% and an NMBE within $\pm 10\%$. No such formal guideline exists for the validation of archetype models. Instead, annual energy use intensity, EUI_a , is often used as an indicator that an archetype adequately represents a subset of buildings. Sansregret et Millette (2009) used EUI_a to validate the archetype generation functionality of the SIMEB software. Vanroy (2024) verified the representativity of their three archetype models of Québec elementary schools by comparing their EUI_a against historical values for Canadian schools. Though not typically used as an indicator, expecting a potential use in demand-side management (DSM) studies, Vanroy (2023) used normalized annual peak electrical demand, P_a^* , to verify the representativity of their archetypes. Consequently, applying principles of application validation (Piemontese et al., 2022), building peak electric demand is also deemed an important metric in this study, as it relates to both DSM needs and operational costs through peak power billing.

The comparison of annual energy intensity, EUI_a , and the annual peak demand normalized by the floor area, P_a^* , of the schools against the baseline model is presented in Tableau 4.4. The six reference schools in vicinity to the Montreal weather station were grouped based on their HVAC system configuration. The first group (IDs S1*–S3*) had the ETS installed on the geothermal loop, i.e., a water loop that supplies WAHPs units located in each thermal zone. The second group (IDs S4–S6), included a second hot water loop; a water-to-water heat pump used the geothermal loop as a heat source to produce higher-temperature water to heat the perimeter through radiators. For the first group of schools (IDs S1*–S3*), the EUI_a values range from 0.28 to 0.30 GJ/m², showing good agreement with the archetype model value of 0.29 GJ/m². The archetype's P_a^* of 0.033 kW/m² fell within the range of 0.029 to 0.038 kW/m² of these schools. For the second group (IDs S4–S6), the EUI_a values exhibit greater variability, ranging from 0.29 to 0.61 GJ/m². S6 stands out as a notable outlier, with an energy intensity of 0.61 GJ/m², more than twice that of the schools S4 and S5 and the archetype model. The

P_a^* values for this group range from 0.032 to 0.058 kW/m², with S6 again exhibiting the largest deviation.

Tableau 4.4 Confirming model accuracy using annual and monthly data

School ID	EUI _a (GJ/m ²)	P_a^* (kW/m ²)
S1*	0.29	0.032
S2*	0.30	0.029
S3*	0.28	0.038
S4	0.32	0.032
S5	0.29	0.034
S6	0.61	0.058
Mean (S1*- S5)	0.30	0.033
A_{adj}	0.29	0.033

Overall, the annual results demonstrate acceptable representativity of the archetype model. We consider the model's results acceptable compared to all schools, except S6, for which the model failed to capture the electric profile and its energy intensity.

4.7 Tested cases

Following the adjustment of the archetype model and confirmation of its representativity, different simulation cases are conducted. As illustrated on Figure 4.2, in all scenarios, the WAHPs are supplied by a plant loop composed of a vertical ground heat exchanger serving as the primary heat source. The adjusted archetype model used as baseline, A_{adj} , has a borefield of 18 boreholes. For an auxiliary heat source to be useful, the borefield must be reduced in all alternative scenarios.

4.7.1 Scenarios with auxiliary heating

The addition of an auxiliary heat source allows a reduction in the size of the borefield with regards to the design peak loads calculated in heating, $Q_{soil,Htg}$. Ensuring the borefield can deliver $Q_{soil,Clg}$ is the minimum limit to this reduction. In theory, the ETS can deduct up to 80 kW from the 174 kW value of $Q_{soil,Htg}$ which would leave 94 kW to be fulfilled by the ground and require a 9 borehole field as per the design parameters of Tableau 4.2 and Tableau 4.3.

However, $Q_{\text{soil,Clg}}$, of 147 kW requires a minimum borefield of 14 boreholes. In order to take into consideration, the layout of the field, all alternative scenarios therefore have a borefield of 15 (5 x 3) boreholes.

The minimum temperature observed going out of the plant loop and into the WAHP in the mechanical drawings of the reference schools was 2.8°C. This value was rounded to 3°C and was adopted as the minimum supply temperature to the WAHPs for all scenarios, such that all auxiliary heat sources downstream of the plant loop were activated whenever the temperature exiting the tempering valve (T_{mix} in Figure 4.2) fell below 3 °C. In one alternate scenario, A_{elec} , an electric boiler of 80 kW capacity is added as an auxiliary heat source downstream of the borefield. The other scenario, A_{ETS} , implements an electric thermal storage (ETS) unit as an auxiliary to the geothermal system and applies a load levelling control strategy for demand management.

4.7.2 ETS model

The ETS considered in this study is a central hydronic device, consisting of three thermal cores, each containing 96 bricks, capable of reaching temperatures up to 760°C and storing approximately 440 kWh of heat. Figure 4.4 shows a schematic representation of the ETS device. Heat extraction is achieved by circulating air over the heated bricks using a variable-speed fan. The hot air then transfers its energy to the building's plant loop through an air-to-liquid heat exchanger.

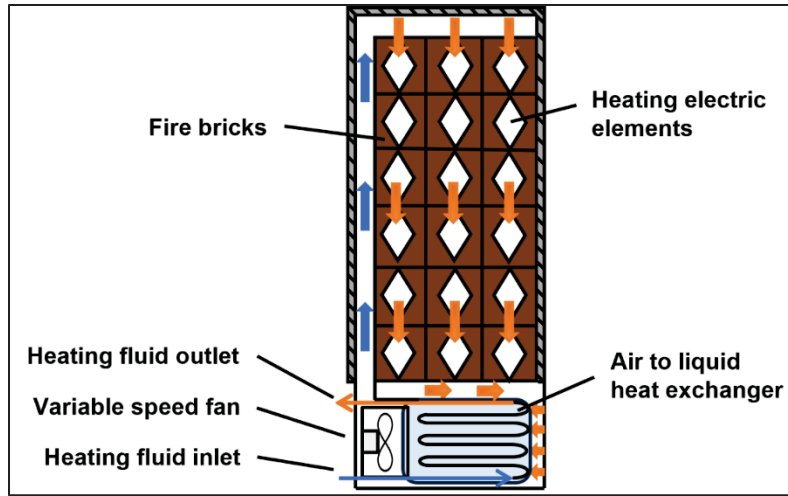


Figure 4.4 Sectional view of the ETS device

The ETS is simulated using an existing model from the literature (Younes et al., 2024) which is implemented as an OpenStudio Measure (Younes, Laurencelle, & D'Avignon, 2023). The measure uses operational schedules to define when the ETS unit can charge (i.e. consume electricity) or discharge (i.e. provide heat to the plant loop). In this study, a load-levelling strategy is applied so the ETS is allowed to discharge with no scheduled authorization restriction. However, it is not allowed to charge between 6h until 9h to ensure no extra power demand is incurred during the grid's peak demand periods. It must also modulate its electricity consumption so that it does not charge when the building demand is ≥ 120 kW. This threshold value is taken from the minimum monthly peak power over winter (from Dec $\rightarrow$ Mar) of the archetype model run using a Canadian Weather Year for Energy Calculation (CWEC) weather file for Montréal, Québec. Tableau 4.5 presents the peak electric power for simulated with the CWEC weather file.

Tableau 4.5 Monthly peak power over the winter season

Month	Peak power (kW)
Dec	122
Jan	139
Feb	132
Mar	127

The ETS charging strategy is defined by how the brick temperature setpoint is fixed. In this case, at each timestep, the brick temperature setpoint is calculated as a function of the outdoor air temperature based on the rule presented in Figure 4.5.

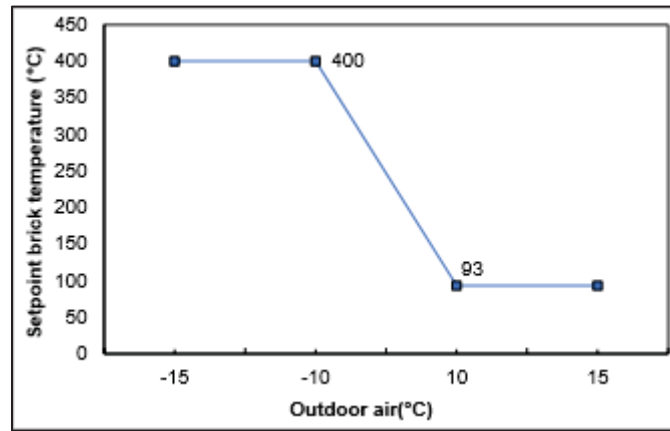


Figure 4.5 Brick charging strategy of the ETS

This control strategy was fixed based on the heating loop requirements at node T_{mix} in Figure 4.2. The thermal power required by the heating loop from an auxiliary equipment in the 15-borehole scenario is plotted on Figure 4.6. It shows that the heating loop requires auxiliary heating (meaning that the temperature at $T_{mix} < 3$ °C) when the outdoor temperature drops below 10 °C. Based on this, the ETS brick temperature control heats the bricks to the device's minimum temperature of 93°C when the outdoor temperature is below 10 °C. The upper limit was fixed by a method inspired by Laroche, Monfet, et D'Avignon (2024). The algorithm identifies "no-charge" windows fixed by on-peak periods (06:00–09:00) or when facility demand exceeds 120 kW. For each restricted window, the cumulative heating energy Q_{stock} is calculated. Using the equation (4.4), the algorithm determines the required core temperature.

$$\Delta T_b = \frac{Q_{stock}}{(M \cdot C_p)_b} \quad (4.4)$$

Where ΔT_b is the required brick core temperature increase, Q_{stock} is the heating energy stocked in the bricks and $(M \cdot C_p)_b$ are the brick mass and specific heat respectively.

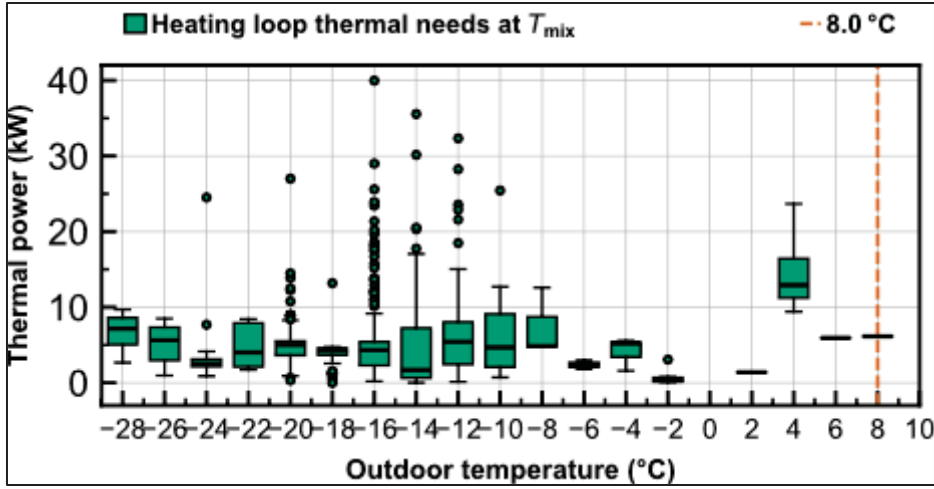


Figure 4.6 Heating loop thermal needs from an auxiliary

4.8 Results and discussion

4.8.1 Impact of ETS on power profile

Figure 4.7 shows simulation results of the baseline and two alternative scenarios from January 12th and 14th. This period was selected as the outdoor temperature (see Figure 4.7a) reached values lower than the typical 99th percentile design condition of -23°C. We can see on Figure 4.7b that the auxiliary electric boiler needs to activate during the morning hours of January 12th (6h to 7h), when the building heating demand increases. In scenario A_{elec} the boiler is active and adding 17 kW to the building's power demand in this period. In scenario A_{ETS} , while the ETS is gradually discharged, since the building's power demand is already above 120 kW, the ETS does not have the authorization to charge. As the building's power demand reaches its maximum at around 6:00 a.m., the ETS does not increase the building's power consumption compared to A_{adj} . In A_{elec} , a peak of 144 kW is reached, while in A_{ETS} the peak electric demand is limited to 127 kW for this day, allowing the building to maintain a flatter energy profile between 6 a.m. and 9 a.m. in A_{ETS} compared A_{elec} . When the building's power demand drops below 120kW at around 9 a.m., the ETS starts to charge until the brick temperature reaches its setpoint. Electric power consumption is nearly identical during off-peak periods for all scenarios.

For the particular cold day of January 14th (a weekend day), the ETS continuously delivers thermal power to the plant loop without charging for a period extending from 6h to 9h. During off-peak hours, the ETS starts to charge while it is supplying auxiliary heating to the plant loop.

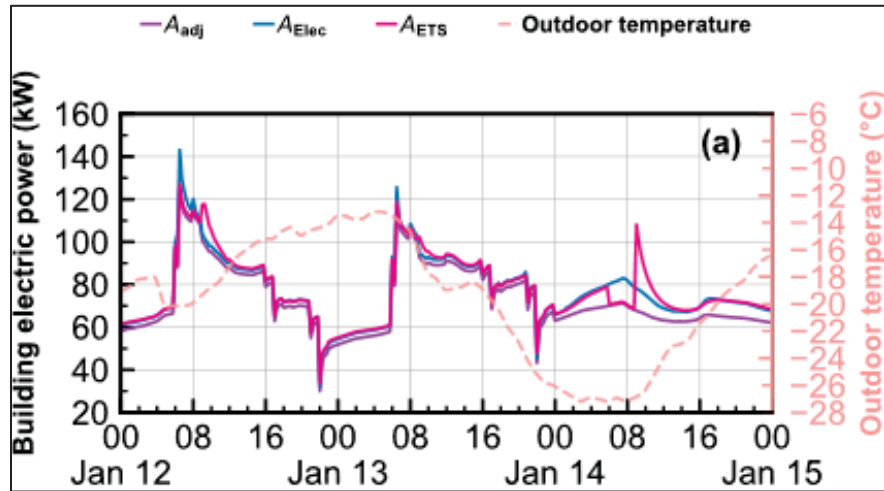


Figure 4.7a Electric power profile in the 3 cases

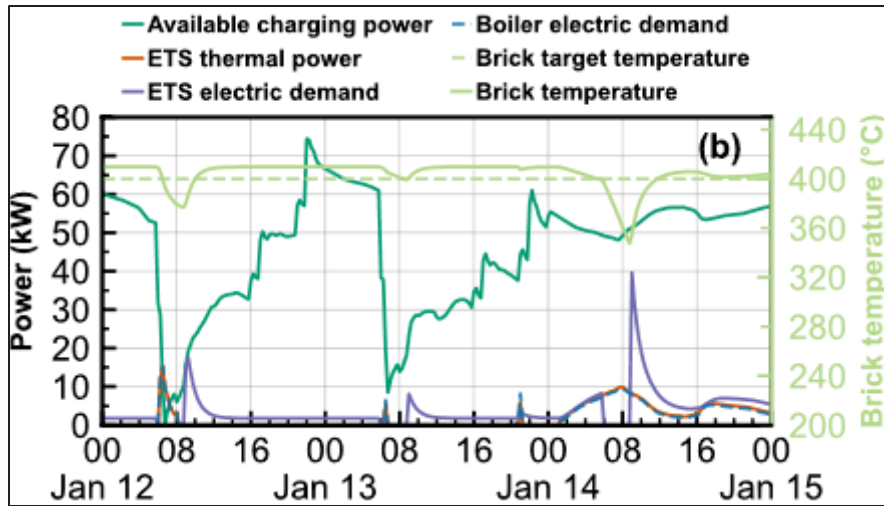


Figure 4.7b Performance of the ETS and electric boiler

4.8.2 Impact of ETS on electric bill

To evaluate the effect of ETS deployment, the electric bill is calculated in all scenarios using Hydro-Québec's M tariff (Hydro-Québec, 2025b). Under this tariff structure, electricity costs

are divided between energy consumption and power demand. The energy portion is billed in two tiers: the first 210000 kWh of electricity consumed is charged at 6.061 ¢/kWh, while any additional consumption beyond this threshold is billed at a lower rate of 4.495 ¢/kWh. In addition, customers must also pay a demand charge based on the maximum power used, set at 17.573 \$/kW.

Tableau 4.6 resumes the results of the electric bill for the winter season of December 1st to March 31st in the three cases. Tableau 4.6 shows that, for winter, A_{ETS} generally has a power bill equivalent to A_{adj} and lower than A_{elec} . Toggling part of the heat load from the geothermal borefield to the ETS device increases electricity consumption in comparison to the baseline case, which slightly increases total monthly operational costs.

Tableau 4.6 Electric bill of the three tested cases

		Dec	Jan	Feb	Mar
A_{adj}	Energy (kWh)	39453	45610	38478	35186
	Cost (\$)	2373	2744	2315	2117
	Power (kW)	122	139	132	127
	Cost (\$)	2147	2437	2325	2228
	Total (\$)	4520	5181	4640	4345
A_{elec}	Energy (kWh)	41229	47662	40275	36997
	Cost (\$)	2480	2867	2423	2226
	Power (kW)	125	157	164	149
	Cost (\$)	2199	2753	2889	2627
	Total (\$)	4679	5620	5312	4853
A_{ETS}	Energy (kWh)	41752	48012	40606	37330
	Cost (\$)	2512	2888	2443	2246
	Power (kW)	125	139	134	129
	Cost (\$)	2193	2444	2352	2270
	Total (\$)	4705	5332	4795	4516

4.9 Conclusion

This paper presents a novel coupling of an ETS device with a vertical GCHPS, where the ETS serves as an auxiliary heat source. An archetype model was created representing an L-shaped, mid-sized elementary school equipped with water-to-air heat pumps supplied by a field of vertical geothermal boreholes serving as the primary heat source. The baseline archetype, equipped with an 18-borehole field adequate to supply 100% of peak winter loads, was adjusted using 15-minute and monthly energy consumption data from reference schools equipped with a similar HVAC system. Using the archetype model, 3 cases were studied: 1) the baseline case with an 18-borehole field, 2) a 15-borehole field with an auxiliary electric boiler, and 3) a 15-borehole field with an ETS device serving as auxiliary. A load levelling control strategy was applied to the ETS, ensuring the ETS did not exacerbate the building's power demand over 120 kW. Results show that the ETS could keep a smoother electric demand profile compared to the boiler case, only mildly increasing the peak power demand (< 5 kW) versus the all-geothermal baseline. The addition of the ETS as an auxiliary heat source allowed a reduction of 3 boreholes.

Configurations with an as auxiliary heat source have other benefits not quantified here. The more balanced loads to the borefield between the cooling and heating season are advantageous in maintaining long-term operation of the ground as heat source. The reduced borefield size reduces capital expenditure costs and the auxiliary heat source provides additional redundancy in case of borehole failure. Testing a broader range of ETS control strategies, variations of borefield operation and configurations would allow a better appreciation of the role ETS devices may play as auxiliary heat sources for GCHPS. The potential for borefield heat injection using ETS may also have some potential. Now that the general applicability of ETS as an auxiliary to GCHPS has been demonstrated, these additional benefits will be explored in future works.

4.10 Acknowledgment

Technical support from Hydro-Québec's Laboratoire des technologies de l'énergie, and the Centre de service scolaire des Trois-Lacs was instrumental in this work. This research received financial support from Hydro-Québec and Mitacs through the Mitacs Accelerate Program (IT27182), as well as Institut AdapT's Mitacs Grant Supplement.

CHAPITRE 5

Discussion

Le chapitre de discussion vise à revenir sur les travaux présentés dans les chapitres précédents et à mettre en relation leurs résultats avec les objectifs du mémoire. Dans un premier temps, les principaux résultats de chaque section sont approfondis, puis les limites de l'étude ainsi que les perspectives de ce projet de recherche sont présentées.

5.1 Vérification du modèle archétype

Après avoir comparé les résultats du modèle A_{adj} à ceux des écoles à l'aide d'indicateurs annuels, l'intensité énergétique (IE) mensuelle et la puissance mensuelle maximale normalisée du modèle est comparée à celles des écoles S1* à S6. La raison pour laquelle S7 n'est pas retenue est expliquée dans la section 5.3. La Figure 5.1 illustre l'intensité énergétique mensuelle des écoles S1 à S6. L'intensité énergétique mensuelle des écoles S1 jusqu'à S5 sont entre 4 kWh/m² et 11.2 kWh/m². Le modèle reproduit l'intensité énergétique mensuelle des écoles de références S1* à S5 de façon satisfaisante. Pour l'école S6, on constate que son intensité énergétique mensuelle est élevée par rapport aux autres écoles. Une hypothèse qui pourrait expliquer cette différence est la date de construction et donc l'enveloppe plus âgée par rapport aux écoles S1* à S5 qui sont de nouvelles constructions.

On constate que l'archétype surestime légèrement l'intensité énergétique des écoles S1* à S5 les mois de mars, avril, janvier et décembre. En mars, l'intensité énergétique de ces écoles varie entre 6.91 et 8.01 kWh/m², alors que l'archétype présente une intensité énergétique de 8.73 kWh/m². À l'inverse, le modèle sous-estime l'intensité énergétique du mois de septembre, avec une valeur de 4.87 kWh/m², comparativement à des consommations comprises entre 5.44 et 6.52 kWh/m² pour les écoles S1* à S5.

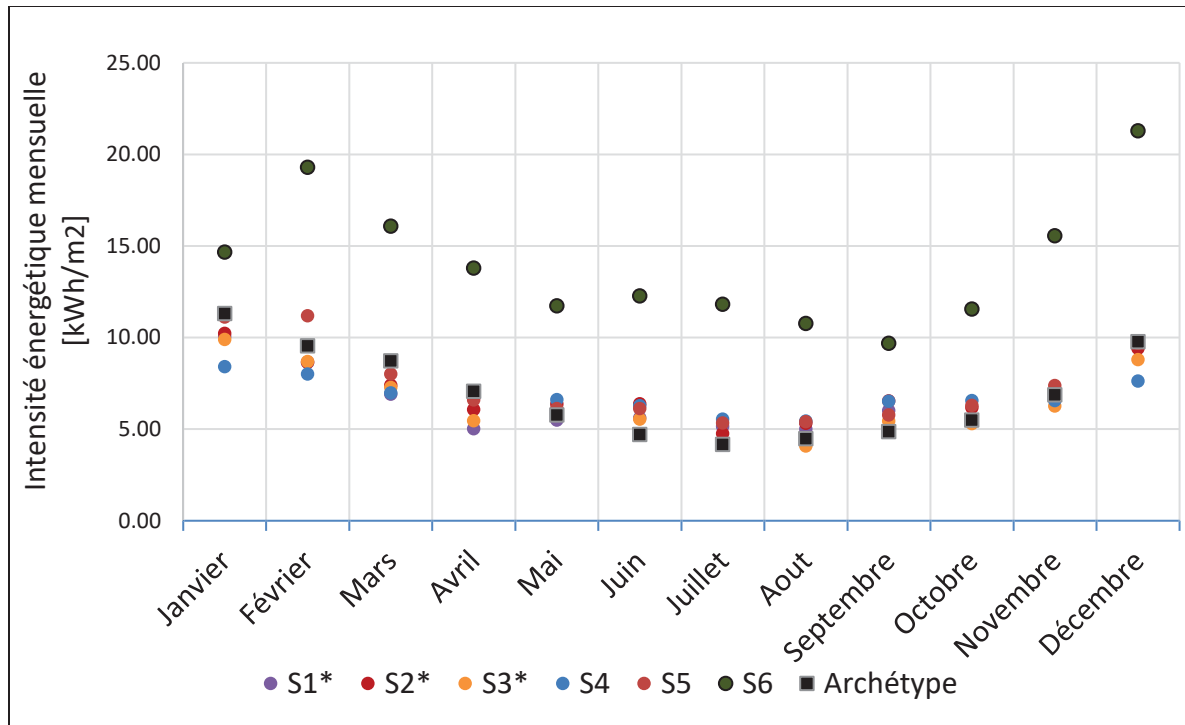


Figure 5.1 Comparaison du profil d'intensité énergétique mensuelle

La Figure 5.2 illustre le profil de puissance maximale mensuelle normalisé des écoles S1* à S6 et de l'archétype. L'analyse porte principalement sur les pointes hivernales et estivales car elles sont importantes pour le dimensionnement des puits géothermique comme expliqué précédemment. Conséquemment, les valeurs des mois de l'intersaison (avril, mai, septembre et octobre) sont jugées moins significatives. Comme le montre la Figure 5.2, la pointe hivernale du modèle se situe dans la plage des valeurs observées pour les écoles S1 à S5. Similairement à la Figure 5.1, on constate que l'école S6 est encore élevée par rapport aux autres écoles, possiblement dû à son enveloppe plus âgée donc probablement moins performante. De même, les pointes estivales sont généralement comparables à celles des écoles S1* à S5, à l'exception du mois de juillet, où le modèle sous-estime légèrement la puissance maximale avec une valeur de 0.015 kW/m², alors que les écoles présentent des valeurs comprises entre 0.016 et 0.022 kW/m². On observe également que le modèle surestime la pointe du mois d'avril, avec une valeur de 0.029 kW/m², comparativement à une plage de 0.023 à 0.027 kW/m² pour les écoles S1* à S5. On juge que les pointes hivernale et estivale du modèle sont acceptables.

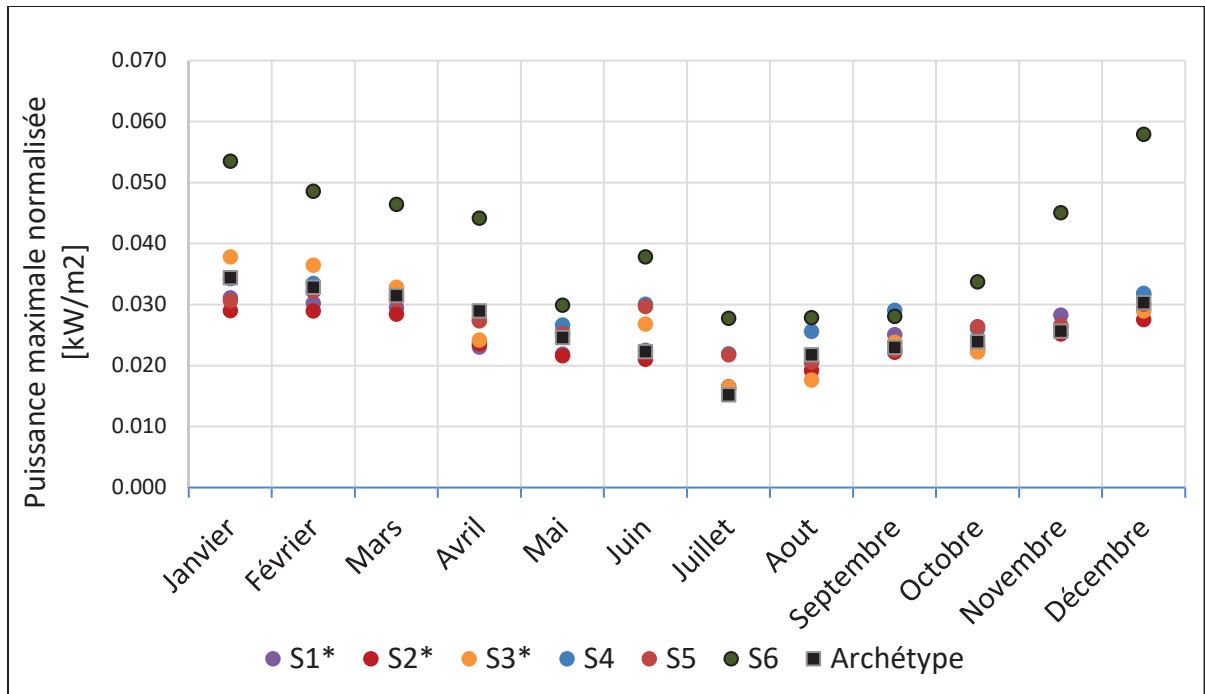


Figure 5.2 Comparaison du profil de puissance maximale normalisée

Après la vérification des résultats mensuels, une étape de vérification du profil de puissance normalisé des écoles est réalisée en le comparant à celui du modèle archétype. Pour cette analyse, la méthode *Box-Whisker-Mean* (BWM) (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2023b) est utilisée. Cette approche graphique est reconnue dans l'ASHRAE Guideline 14 pour la validation des modèles énergétiques en ce qui a trait à leur représentativité de l'appel de puissance d'un bâtiment. La méthode BWM est employée sur les Figure 5.3 à Figure 5.10 afin de comparer le profil de puissance normalisé du modèle archétype à celui de trois des écoles étudiées, soit S1*, S2* et S3*, les seules pour lesquelles nous avons accès aux profils de puissance aux 15 minutes. L'analyse des profils de puissance normalisé met en évidence une bonne capacité du modèle à reproduire le comportement énergétique journalier global de trois des écoles étudiées. Les distributions horaires représentées aux Figure 5.3 à Figure 5.5 montrent que le modèle reproduit correctement les principales phases du profil, notamment la faible consommation nocturne (23h à 4h), l'augmentation rapide en anticipation du début des activités scolaires (4h à 9h) et la diminution progressive en fin de journée (16h à 23h). Concernant la période de pointe matinale, le modèle

représente de manière satisfaisante le moment d'apparition de la pointe, avec une augmentation de la puissance observée principalement entre 5 h et 7 h et un maximum atteint autour de 7 h. Seule l'école S1* démontre un appel de puissance légèrement plus élevé à 8h qu'à 7h ; la différence moyenne demeure faible à 0.001 kWh/m². La durée de la pointe est également correctement représentée, puisque le modèle maintient un niveau de puissance élevé durant la période de pointe du bâtiment (de 7h à 9h), avant d'amorcer une décroissance progressive. Toutefois, certaines différences apparaissent au niveau de l'amplitude de la pointe : pour les écoles S1* et S3*, le modèle tend à légèrement sous-estimer la puissance maximale atteinte pendant la pointe de 0.0008 kW/m². alors que pour l'école S2* la concordance entre la moyenne simulée et la moyenne mesurée est plus proche, avec une représentation plus fidèle de la période matinale entre 6h et 8h. Globalement, le modèle capture adéquatement la dynamique temporelle de la pointe matinale, incluant son déclenchement, sa durée et son ampleur, ce qui confirme sa pertinence pour représenter le profil de demande des bâtiments scolaires. Les écarts résiduels peuvent être attribués aux variations réelles d'occupation et aux stratégies de contrôle des systèmes CVCA.

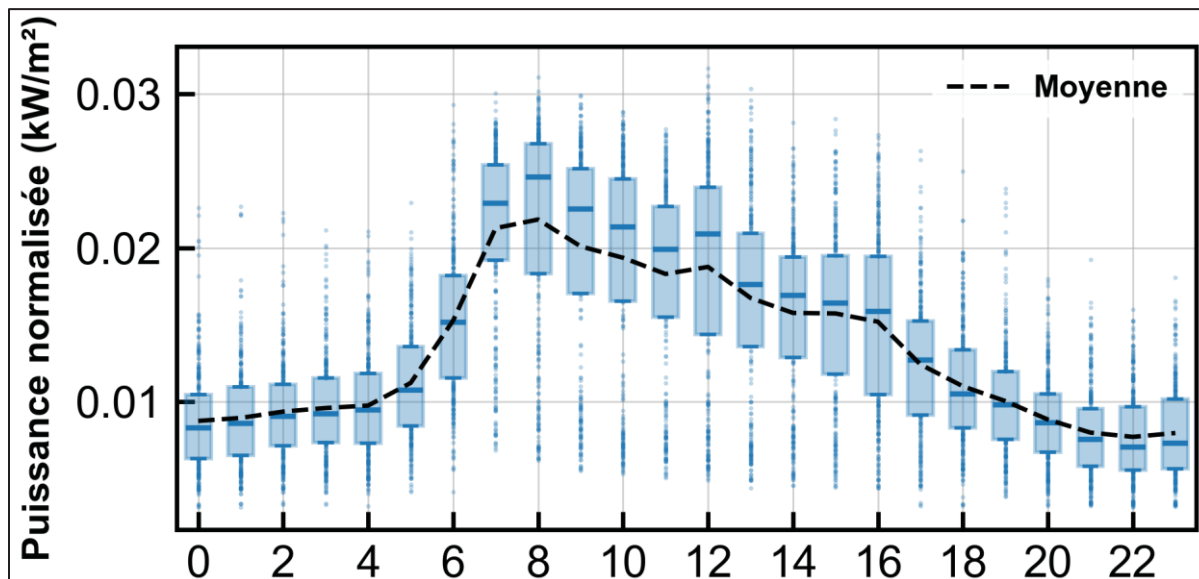


Figure 5.3 Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S1*

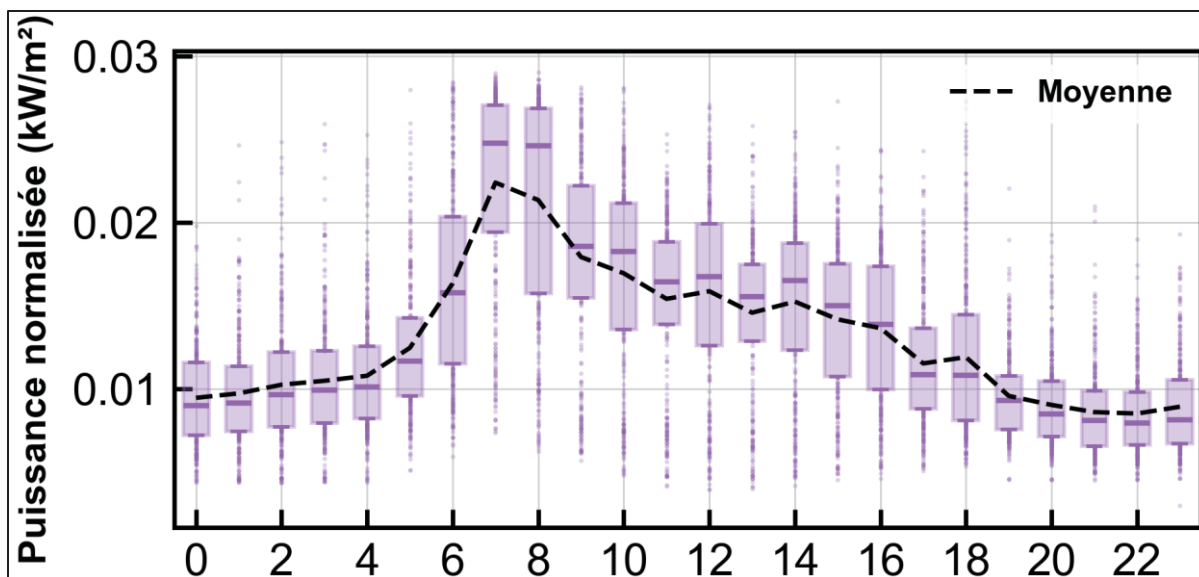


Figure 5.4 Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S2*

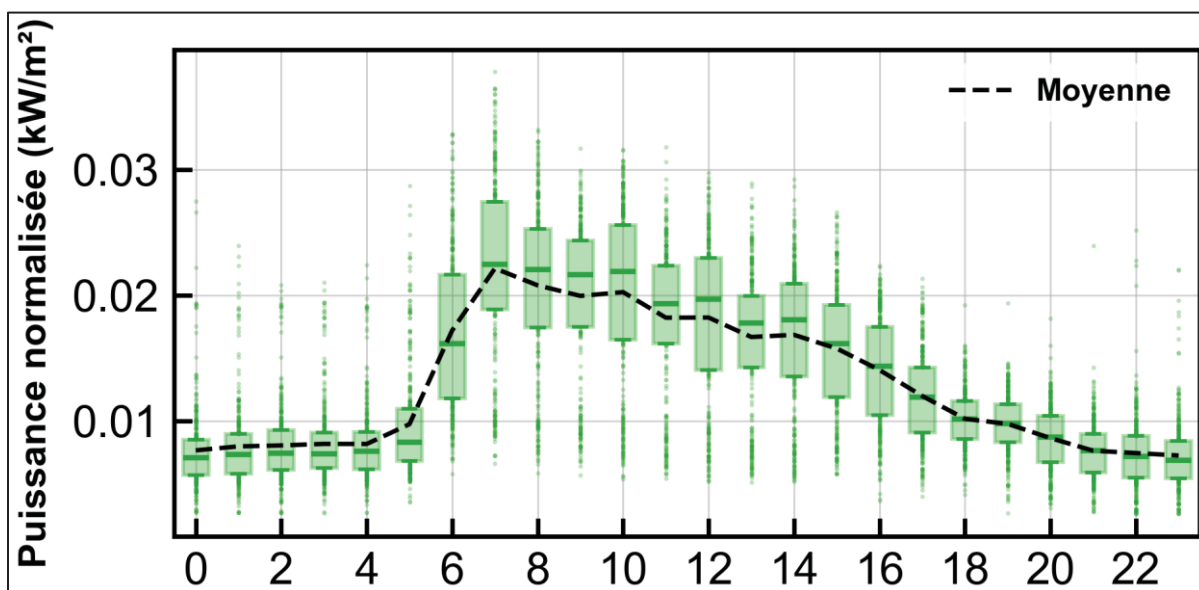


Figure 5.5 Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'école S3*

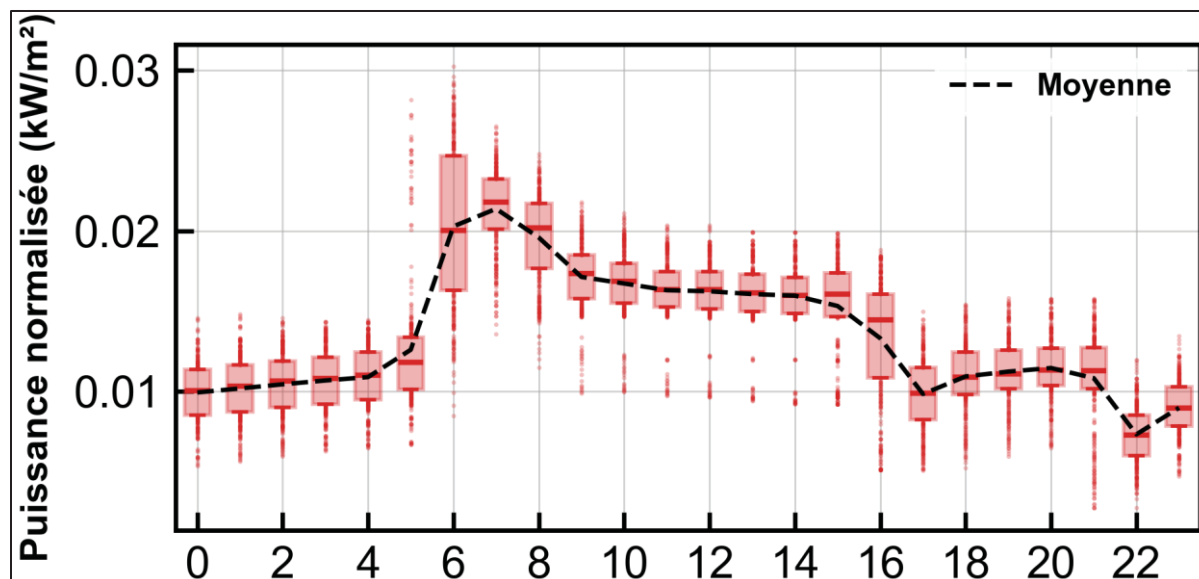


Figure 5.6 Profil des jours de semaine de la saison d'hiver de l'archétype

Les Figure 5.3 à Figure 5.6 présentent les profils des jours de fin de semaine pour les trois écoles ainsi que pour le modèle, pour une saison hivernale. Les résultats montrent que les profils réels présentent une consommation relativement stable, avec des variations horaires caractérisées par une diminution de la puissance durant la période de milieu de journée et une remontée progressive en fin de journée. Les écoles S1* et S2* présentent des niveaux moyens plus élevés, autour de 0.010 à 0.012 kW/m², avec une dispersion importante et plusieurs valeurs extrêmes, traduisant une variabilité liée aux conditions réelles d'exploitation pendant les fins de semaines. À l'inverse, l'école S3* présente un profil plus homogène avec une amplitude journalière réduite, indiquant un fonctionnement plus stable des systèmes. Le modèle reproduit globalement la tendance moyenne observée dans les trois écoles, notamment la baisse de consommation en milieu de journée et l'augmentation en soirée, ce qui confirme sa capacité à représenter le comportement énergétique global des bâtiments. Toutefois, la distribution des valeurs simulées est moins dispersée que celle des données mesurées, avec une représentation limitée des pics de consommation observés dans les bâtiments réels. Cette différence indique que le modèle capture correctement les caractéristiques moyennes du profil énergétique de fins de semaines. Les profils des jours de fin de semaine sont toutefois moins critiques puisqu'ils

sont d'ampleur moins importantes, ils n'incluent pas de pointe mensuelle ou saisonnière et n'ont donc pas d'impact sur le dimensionnement des puits ni sur l'opération du stockage thermique comme auxiliaire. Globalement, la comparaison met en évidence une bonne adéquation entre le modèle et les données pendant les périodes non occupées.

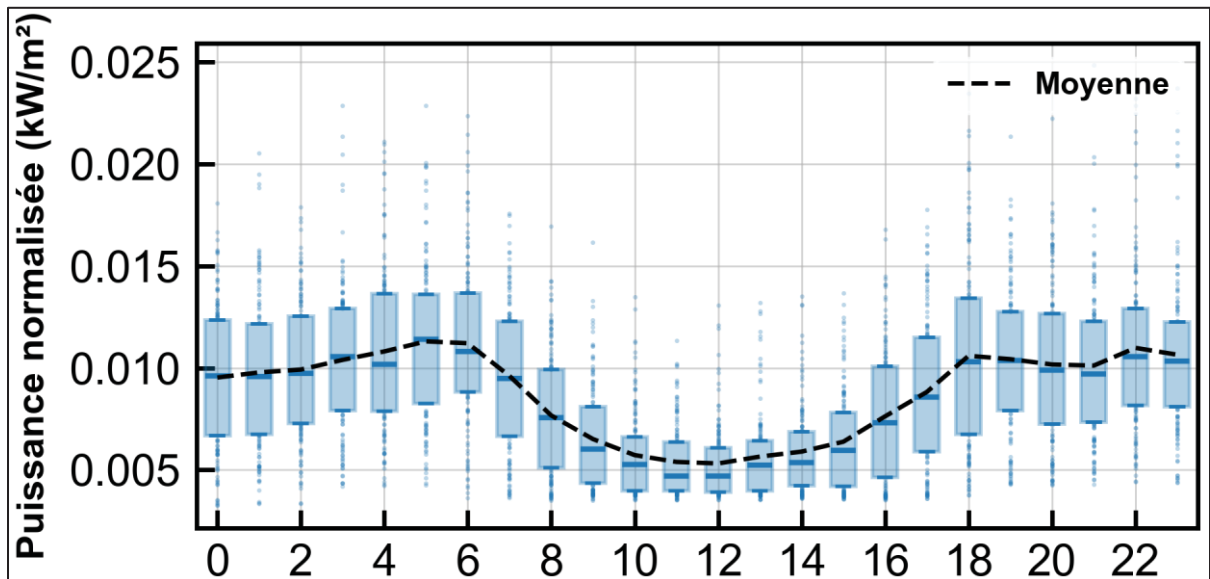


Figure 5.7 Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S1*

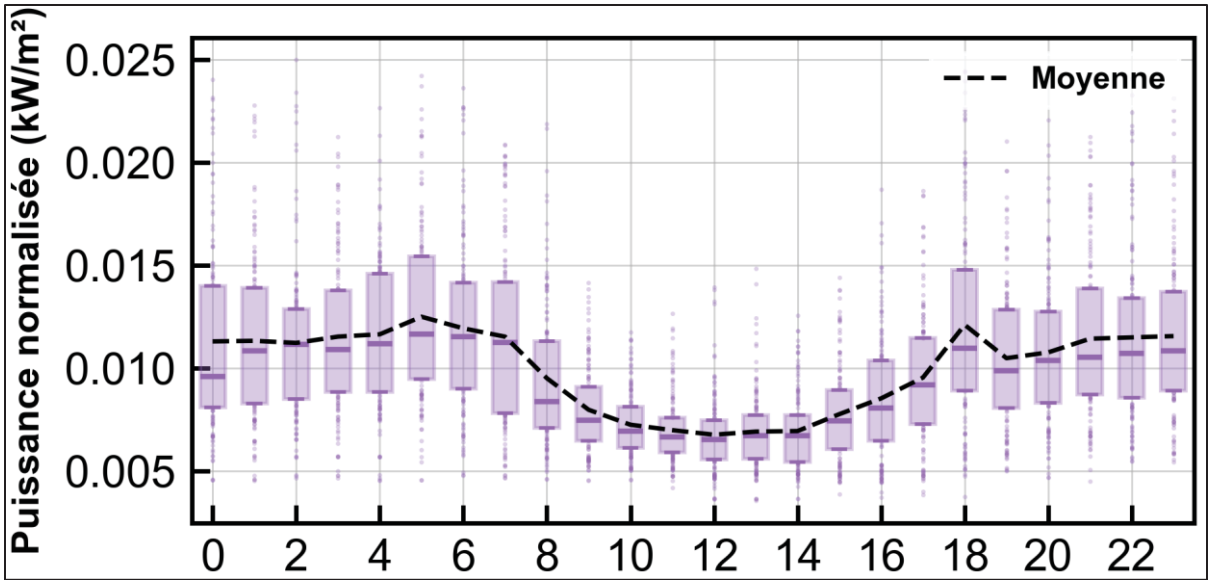


Figure 5.8 Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S2*

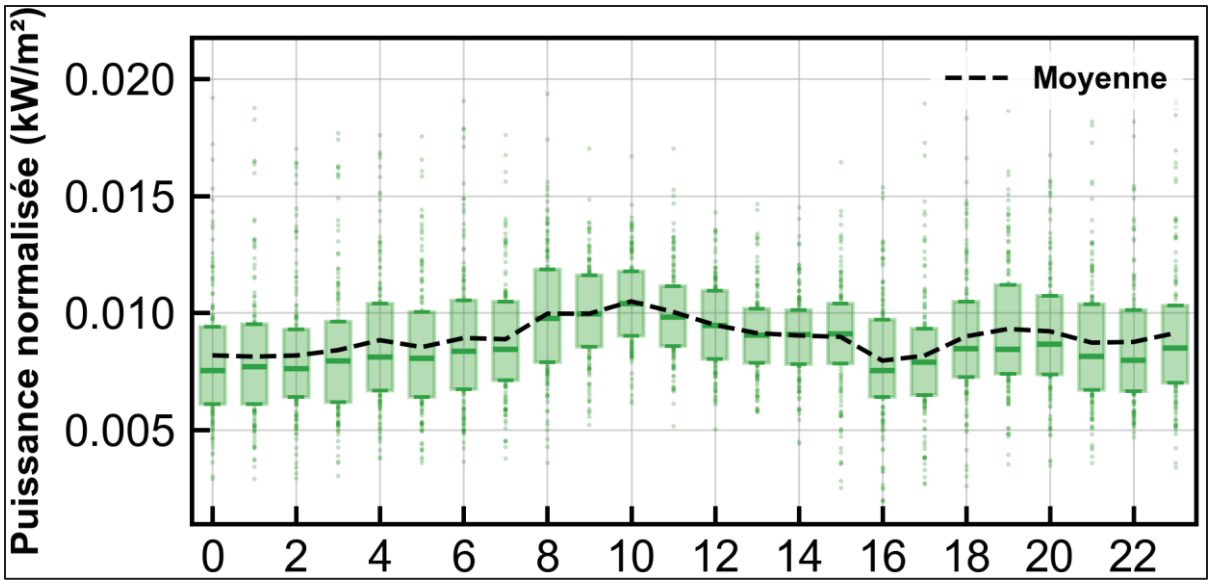


Figure 5.9 Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'école S3*

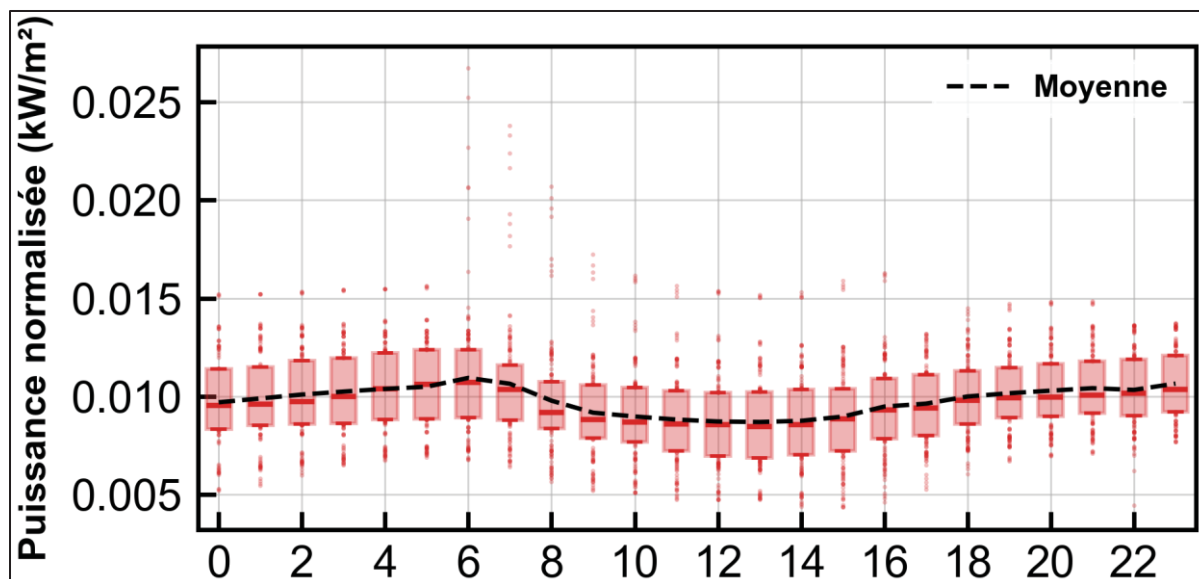


Figure 5.10 Profil des jours de fin de semaine de la saison d'hiver de l'archétype

5.2 Principaux résultats

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le potentiel de l'utilisation d'un accumulateur thermique central (ATC) comme source auxiliaire d'un système de chauffage géothermique dans une école primaire québécoise. Cet objectif s'articule autour trois sous-objectifs suivants :

- 1) Développer un modèle archétype représentatif d'une école primaire québécoise dans laquelle un tel système pourrait être implanté;
- 2) Simuler la performance énergétique de trois configurations de chauffage géothermique : avec appoint électrique, avec un ATC comme source auxiliaire et sans système auxiliaire; et
- 3) Évaluer les performances énergétiques et la viabilité économique de ces trois configurations de chauffage géothermique.

Le chapitre 3 adresse le premier sous-objectif en proposant un modèle archétype représentatif des écoles de référence par sa géométrie, ses horaires et densités d'occupation, ses charges internes ainsi que son système CVCA. Le travail de vérification du modèle rapporté aux chapitres 4 et 5 complète cet objectif en assurant sa représentativité des écoles de référence.

Le chapitre 4, présenté sous forme d'un article de conférence, répond aux deux objectifs restants. Dans un premier temps, au chapitre 4, le profil de consommation électrique du modèle archétype a été comparé aux profils de consommation horaire de trois écoles de référence (S1*, S2* et S3*) pour lesquelles des données de consommation électrique étaient disponibles. Cette comparaison du moment, durée et ampleur de la pointe électrique a permis de corriger le profil de consommation du modèle archétype afin d'en améliorer la représentativité. De plus, une comparaison de l'intensité énergétique (IÉ) annuelle et de la puissance maximale normalisée (P_a^*) annuelle du modèle avec celles de six écoles de référence a permis de confirmer les résultats du modèle. Une fois la représentativité du modèle confirmée, trois scénarios de chauffage géothermique ont été simulés au chapitre 4 :

- 1) Un système entièrement géothermique, dont le dimensionnement est basé sur les charges nominales de chauffage du bâtiment;
- 2) Un système géothermique dimensionné selon les charges nominales de climatisation et couplé à un accumulateur thermique centralisé (ATC); et
- 3) Un système géothermique identique à celui du deuxième scénario, mais utilisant une chaudière électrique comme système d'appoint en remplacement de l'ATC.

Enfin, les performances de ces trois scénarios ont été évaluées à l'aide de deux indicateurs. Le premier, l'appel de puissance, vise à quantifier la capacité du couplage avec un ATC à réduire la puissance de pointe appelée sur le réseau électrique par rapport à un système d'appoint électrique conventionnel. Le second est un indicateur économique permettant d'évaluer les économies réalisées sur les coûts de la facture d'électricité vis-à-vis de l'alternative électrique. De plus, le scénario intégrant un ATC n'a entraîné qu'une augmentation de 4 % de la facture d'électricité par rapport au scénario sans système d'appoint, tandis que le recours à une chaudière électrique a provoqué une hausse de 10 % par rapport à ce même scénario, ce qui équivalant à une économie de 1 116 \$/saison hivernale dans le cas d'utilisation de l'ATC à la place d'une chaudière électrique.

Malgré ces résultats intéressants, deux aspects méritent une analyse plus approfondie.

5.2.1 Dépassement de la puissance de nivelage

Le Tableau 5.1 résume les résultats de la facture électrique pour la même saison pour les trois scénarios : A_{Geo} (sans auxiliaire), A_{ATC} (avec ATC) et A_{Elec} (avec chaudière électrique).

Tableau 5.1 Pointe électrique mensuelle pendant une saison hivernale

Décembre			Janvier			Février			Mars		
A_{Geo}	A_{ATC}	A_{Elec}	A_{Geo}	A_{ATC}	A_{Elec}	A_{Geo}	A_{ATC}	A_{Elec}	A_{Geo}	A_{ATC}	A_{Elec}
kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
122	125	125	139	139	157	132	134	164	127	129	149

Tableau 5.2 Facture électrique pour une saison hivernale

Saison hivernale (Déc → Mars)		
A_{Geo}	A_{ATC}	A_{Elec}
18 686 \$	19 348 \$	20 464 \$

Les résultats montrent que l'ATC permet de maintenir un profil de demande électrique sans causer une pointe électrique aussi forte que le scénario avec chaudière électrique, tout en n'augmentant que très légèrement la pointe électrique (moins de 5 kW) par rapport au scénario sans auxiliaire. Or même cette légère augmentation (<5 kW) du scénario A_{ATC} vis-à-vis de A_{Geo} est quelque peu surprenante. La stratégie de gestion de la demande étant un nivelage de la puissance avec un seuil de 120 kW, il était attendu que la puissance maximale mensuelle n'augmente pas car elle dépassait déjà cette valeur. En effet, le Tableau 5.1 illustre que la puissance maximale mensuelle la plus faible observée pour A_{Geo} est de 122 kW. Le choix d'un seuil de 120 kW est basé sur un arrondi de cette valeur afin de définir une limite de puissance simple et représentative du profil de consommation étudié. Cette légère différence entre la pointe réelle et le seuil de nivelage permettait également de conserver une marge de réduction de la demande sans modifier significativement le comportement global du système.

Une analyse plus poussée démontre que la raison pour laquelle la pointe électrique mensuelle du scénario avec ATC dépasse celle du scénario de base pour les mois de janvier, mars et décembre est liée à la performance des pompes à chaleur géothermiques. En effet, le rendement

des PACG diminue lorsque leur température d'alimentation diminue. Dans le scénario avec ATC, le système utilise seulement 15 puits géothermiques comparativement aux 18 puits du scénario de base. Cette réduction du nombre de puits entraîne une diminution de la température d'alimentation des PAC, ce qui réduit leur performance et augmente leur consommation électrique nécessaire pour répondre à la demande de chauffage.

La Figure 5.11 présente la différence entre les températures d'alimentation des PAC pour les deux scénarios au moment des pointes électriques mensuelles de janvier, mars et décembre. On observe que la température d'alimentation des PAC dans le scénario ATC est inférieure à celle du scénario de base géothermique. Cette diminution de température explique ainsi la baisse de performance des PAC et l'augmentation de la pointe électrique observée dans le scénario ATC ce qui confirme que la pointe observée pendant ces mois n'est pas due à l'ATC.

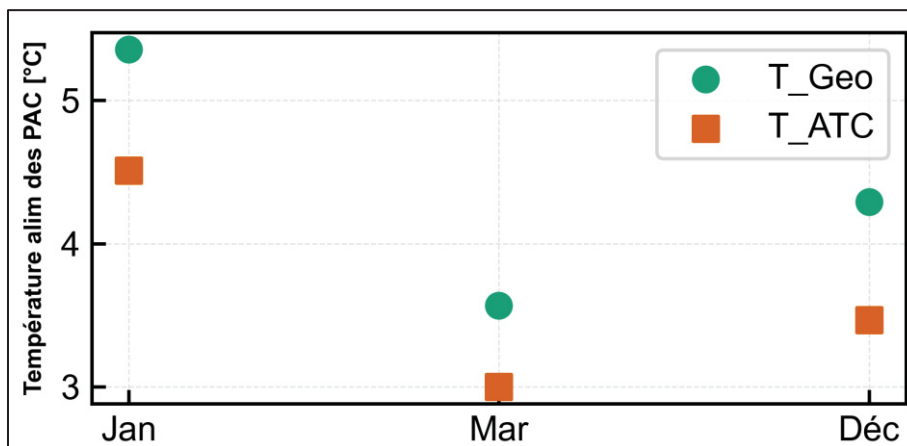


Figure 5.11 Température d'alimentation des PAC pour les scénarios A_{Geo} et A_{ATC}

5.2.2 Surdimensionnement de l'ATC

Si on observe la Figure 4.6, on constate que la puissance demandée par la boucle n'augmente pas en fonction de la température extérieure. En effet, la boucle requiert une puissance thermique de 40 kW à une température extérieure de -16 °C, alors qu'elle ne nécessite que 10 kW à -28 °C. Cette différence s'explique par les conditions d'occupation du bâtiment. La température de -28 °C est survenue durant une période inoccupée de nuit, où la consigne de

température dans les salles est plus faible, ce qui entraîne une demande de chauffage moins élevée. À l'inverse, la température de -16 °C a eu lieu pendant une période occupée, où la présence d'occupants contribue à augmenter les besoins de chauffage en augmentant la consigne de température des locaux et le débit d'air ventilé qui doit être chauffé.

Par ailleurs, on pourrait conclure de l'analyse de la Figure 4.6 que l'ATC est surdimensionné par rapport aux besoins de la boucle, puisque la puissance thermique maximale requise est de 40 kW, alors que sa puissance nominale est de 80 kW. Or, il faut rappeler que ces résultats sont propres aux conditions météorologiques simulées. En effet, le fichier météo choisit dans cette étude est un fichier CWeC (*Canadian Weather Year for Energy Calculation*). C'est un fichier de données météorologiques fréquemment utilisé par les concepteurs de bâtiments, les ingénieurs et les spécialistes de la simulation énergétique pour évaluer la performance énergétique des bâtiments dans des conditions 'typiques'. Il est créé par le Service météorologique du Canada à partir de la méthode TMY (*Typical Meteorological Year*), qui sélectionne les mois les plus représentatifs d'une période historique de 15 à 30 ans afin de construire une année climatique reflétant les conditions météorologiques typiques d'un lieu. Ces fichiers ne représentent pas les conditions les plus extrêmes attendues sur une la durée de vie d'un système de chauffage (20-30 ans).

Pour conclure si l'ATC est réellement surdimensionné par rapport aux besoins de la boucle, une autre analyse serait nécessaire se basant sur les données plus extrêmes de température attendues. De plus, même en cas de surdimensionnement de l'ATC, une autre stratégie de contrôle pourrait permettre d'exploiter l'ATC jusqu'à sa capacité nominale de 80 kW, discuté à la section 5.3.

5.3 Limitations et perspectives

Malgré la pertinence des résultats obtenus, cette étude comporte certaines limites. D'une part, ce mémoire se limite à évaluer le potentiel du couplage ATC-géothermie selon les deux indicateurs mentionnés précédemment alors que d'autres indicateurs pourraient influencer cette évaluation. Par exemple, les coûts de forage des systèmes géothermiques et des auxiliaires seraient à considérer plutôt qu'uniquement les coûts énergétiques en opération. En effet,

l'intégration d'un auxiliaire modifie le dimensionnement requis du champ de puits géothermiques en réduisant le nombre de puits nécessaires. Ainsi, un système de PACG sans auxiliaire pourrait nécessiter des investissements initiaux plus importants, tandis que la réduction du dimensionnement du champ de puits pourrait générer des économies significatives. La prise en compte des coûts d'investissement aurait donc permis d'évaluer si des gains financiers additionnels sont obtenus par l'intégration d'un auxiliaire.

De plus, l'impact d'une source auxiliaire au gaz n'a pas été simulé, ce qui rendait la comparaison des émissions de GES non pertinentes vu le faible taux d'émissions associé à l'électricité québécoise, fortement décarbonée. Ce scénario aurait été pertinent à simuler afin d'évaluer l'impact d'une source d'appoint plus émettrice sur le bilan environnemental du système étudié.

Le scénario avec ATC comme source auxiliaire présente possiblement d'autres avantages qui n'ont pas été quantifiés dans ce projet, comme la recharge des puits au moyen de l'ATC dans l'intersaison. Dans un système géothermique, un déséquilibre entre l'extraction de chaleur du sol en période de chauffage et le rejet de chaleur en période de climatisation peut entraîner une dérive progressive de la température du sol et une diminution de la performance du champ de puits à long terme (Lazzari, Priarone, & Zanchini, 2010). La recharge thermique permet de compenser ce déséquilibre en réinjectant de la chaleur dans le sol, ce qui contribue à maintenir des conditions d'opération favorables pour les pompes à chaleur et donc une meilleure performance à long terme. Un ATC pourrait faciliter cette recharge en augmentant temporairement la chaleur disponible dans la boucle en intersaison, permettant ainsi de transférer davantage de chaleur vers le champ de puits. On pourrait également utiliser la recharge pour augmenter la température dans la boucle et donc améliorer la performance des thermopompes ce qui permettrait de réduire d'avantage la pointe électrique.

Plus important encore, l'analyse de performance du couplage pour la région de Sept-Îles de l'école S7 n'a pas été inclus dans cette étude. En effet, une nouvelle démarche de dimensionnement aurait été nécessaire afin de tenir compte des conditions climatiques propres à cette région, notamment des besoins de chauffage et de climatisation différents de ceux de la région de Montréal. Ces variations entraîneraient une modification de la capacité requise des

thermopompes ainsi que du nombre de puits géothermiques nécessaires. Il est intéressant de noter que le système de chauffage de l'école S7 comprend deux ATC plutôt qu'un seul. L'étude de ce site pourrait donc être particulièrement pertinente, puisque le climat de Sept-Îles devrait entraîner des besoins de chauffage nettement supérieurs aux besoins de climatisation. Ainsi, un scénario avec source auxiliaire pourrait solliciter davantage l'ATC, ce qui pourrait permettre d'observer plus clairement son impact sur la pointe et sur la facture électrique comparativement au cas étudié pour la région de Montréal.

Maintenant que la faisabilité générale de l'utilisation de l'ATC comme auxiliaire à un système PACG a été démontrée, ces avantages supplémentaires devraient faire l'objet de travaux futurs à travers une étude paramétrique.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer le potentiel des accumulateurs thermiques de chaleur (ATC) comme source auxiliaire à un système de pompe à chaleur géothermique (PACG) dans les écoles primaires québécoises.

Dans un premier temps, une revue de la littérature ainsi que l'analyse de différents modèles d'archétypes ont permis de démontrer que les caractéristiques thermiques des bâtiments scolaires jouent un rôle déterminant dans l'élaboration de modèles représentatifs et performants. Cette démarche a conduit au développement d'un modèle d'archétype adapté aux spécificités de sept écoles de référence. En intégrant une géométrie représentative, des propriétés thermiques conformes aux bâtiments étudiés ainsi qu'un système CVCA approprié, cet archétype a constitué un cadre robuste pour l'évaluation de ce couplage.

L'archétype développé présente une géométrie en forme de L, une superficie de plancher de 4 032 m² et un taux de fenestration correspondant à 32 % de la superficie de plancher. Les valeurs RSI de l'enveloppe respectent les exigences minimales du Code national de l'énergie pour les bâtiments (CNEB) 2011, tout comme les horaires et les densités de charges internes utilisés. Le système CVCA est composé de pompes à chaleur (PAC) eau-air desservant les salles de classe, les bureaux administratifs, la bibliothèque, les corridors et les toilettes, tandis que les autres espaces sont chauffés par des aérothermes électriques. Les pompes à chaleur (PAC) sont alimentées par le système géothermique pour assurer le chauffage et la climatisation. Le modèle sans système auxiliaire et muni d'un champ de 18 puits permettant de couvrir 100 % des besoins de chauffage hivernaux, a été ajusté à partir de données de consommation énergétique mensuelles et des données de 15 minutes provenant des écoles de référence équipées d'un système CVCA similaire. Plusieurs indicateurs sont utilisés afin de valider les résultats du modèle archétype. L'intensité énergétique et la puissance maximale normalisée permettent de vérifier les résultats annuelle et mensuelle. De plus, le profil de puissance normalisé des écoles est comparé à celui du modèle archétype afin d'évaluer leur concordance. Cette comparaison est réalisée à l'aide de la méthode *Box-Whisker-Mean* (BWM).

À partir de cet archétype ajusté, trois scénarios ont ensuite été étudiés : (1) un système géothermique sans auxiliaire comprenant un champ de 18 puits, (2) un champ réduit à 15 puits couplés à une chaudière électrique et (3) un champ de 15 puits couplés à un ATC. Une stratégie de nivelage de la charge a été appliquée au scénario intégrant un ATC, limitant la puissance maximale appelée à 120 kW.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration d'un ATC permet de réduire le nombre de puits géothermiques sans augmenter la pointe électrique du bâtiment. En effet, l'ATC a permis une réduction des coûts énergétiques de 1 116 \$/saison hivernale dans le cas de l'utilisation de l'ATC en remplacement d'une chaudière électrique, ainsi qu'une diminution moyenne des pointes d'appel de puissance électrique de 17 kW par rapport à une chaudière électrique utilisée comme système auxiliaire. Ces résultats mettent en évidence le potentiel des ATC comme solution auxiliaire pour optimiser le dimensionnement des champs géothermiques sans pénaliser la puissance appelée.

Enfin, bien que cette étude ait permis de démontrer la faisabilité du couplage entre un ATC et un système PACG, plusieurs pistes de recherche demeurent à explorer. L'évaluation d'un éventail plus large de stratégies de contrôle des ATC, de différentes conditions d'exploitation ainsi que de diverses configurations de champs de puits permettrait de mieux quantifier leur contribution et d'optimiser leur intégration. Des travaux futurs sur ces points permettraient de préciser les bénéfices énergétiques, économiques et opérationnels de cette approche dans les bâtiments scolaires québécois.

ANNEXE I

Coefficients générés pour la modélisation des PACG dans EnergyPlus

Les points de données sont obtenus à partir des données fournies par le fabricant de la PACG. Les données sont extraites du catalogue ClimateMaster (ClimateMaster.). Les points de données doivent présenter des conditions d'entrée variables (par exemple les débits d'air, les températures d'entrée d'eau, etc.) couvrant l'ensemble de la plage de fonctionnement de la PACG. Les tableaux de correction fournis par le fabricant doivent être utilisés afin d'étendre la plage des données du catalogue, de manière à obtenir un ensemble adéquat de paramètres et de coefficients.

Les coefficients A_X ; B_X ; C_X ; D_X et E_X des équations (1.3) à (1.7) ne sont pas disponibles dans les documents du fabricant. La seule manière d'y accéder consiste à estimer de manière itérative leurs valeurs en les comparant aux données disponibles dans la fiche technique et en minimisant l'erreur. Les conditions de référence pour le mode chauffage est une température d'entrée d'eau de $EWT = 30^\circ\text{F} = -1.1^\circ\text{C}$ et une température d'entrée de l'air de $EAT = 50^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$. Pour le mode refroidissement, une température d'entrée d'eau de $EWT = 80^\circ\text{F} = 26.7^\circ\text{C}$, une température d'entrée de l'air sec de $EAT(\text{DB}) = 80.6^\circ\text{F} = 27^\circ\text{C}$ et une température d'entrée de l'air humide de $EAT(\text{WB}) = 70^\circ\text{F} = 21^\circ\text{C}$. Les tableaux A I-1, A I-2, A I-3 et A I-4 résument les conditions de référence et les coefficients implémentés pour les modèles de PACG en mode chauffage et refroidissement.

Tableau A I-1 Les conditions de référence en mode chauffage

Nom de la PACG	TR H V 012 (PSC Blower)
Débit volumique d'air de référence (m^3/s)	0.188778982
Débit volumique d'eau de référence (m^3/s)	0.00018927
Puissance de référence (W)	4903
Puissance nominale (W)	880
Nom de la PACG	TR H V 024 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m^3/s)	0.235973716
Débit volumique d'eau de référence (m^3/s)	0.000239742
Puissance de référence (W)	5630
Puissance nominale (W)	872
Nom de la PACG	TR H V 030 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m^3/s)	0.471947432

Nom de la PACG	TR H V 012 (PSC Blower)
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.000473175
Puissance de référence (W)	11320
Puissance nominale (W)	1942
Nom de la PACG	TR H V 042 (PSC Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.660726428
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.000662445
Puissance de référence (W)	16768
Puissance nominale (W)	3069
Nom de la PACG	TR H V 060 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.920297503
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.00094635
Puissance de référence (W)	24546
Puissance nominale (W)	4360

Tableau A I-2 Les coefficients en mode chauffage

	Ax	Bx	Erreur quadratique moyenne (RMS) de la capacité de chauffage (%)	Erreur quadratique moyenne (RMS) de l'absorption de chaleur (%)	Erreur quadratique moyenne (RMS) de la puissance (%)
Nom de la PACG	TR H V 012 (PSC Blower)				
Coefficient 1	-3.17873385	-6.90126439	1.08	2.69	1.27
Coefficient 2	-0.65760819	6.10753129			
Coefficient 3	4.46732823	2.13367180			
Coefficient 4	0.074151051	-0.473493842			
Coefficient 5	0.106930762	0.054294363			
Nom de la PACG	TR H V 024 (ECM Blower)				
Coefficient 1	-3.25683999	-6.51666072	1.12	2.21	1.26
Coefficient 2	-0.65839571	6.27035015			
Coefficient 3	4.54832680	1.76388856			
Coefficient 4	0.07688474	-0.62104367			
Coefficient 5	0.101510235	0.041147019			
Nom de la PACG	TR H V 030 (ECM Blower)				
Coefficient 1	-3.07195548	-6.51004367	1.11	2.57	1.18
Coefficient 2	-0.66159570	6.27993860			
Coefficient 3	4.39277700	1.63871719			
Coefficient 4	0.052367806	-0.510513164			
Coefficient 5	0.10161237	0.042641114			
Nom de la PACG	TR H V 042 (PSC Blower)				
Coefficient 1	-3.20477317	-7.07478196	1.04	2.82	1.32
Coefficient 2	-0.65820425	6.09204307			
Coefficient 3	4.49557931	2.32429109			
Coefficient 4	0.073062829	-0.478710916			
Coefficient 5	0.107435679	0.055188107			

	Ax	Bx	Erreur quadratique moyenne (RMS) de la capacité de chauffage (%)	Erreur quadratique moyenne (RMS) de l'absorption de chaleur (%)	Erreur quadratique moyenne (RMS) de la puissance (%)
Nom de la PACG	TR H V 060 (ECM Blower)				
Coefficient 1	-3.36589005	-7.15550958	1.22	2.72	1.48
Coefficient 2	-0.65209597	6.01032603			
Coefficient 3	4.66080720	2.46944404			
Coefficient 4	0.049655103	-0.475522306			
Coefficient 5	0.11171824	0.056963318			

Tableau A I-3 Les conditions de référence en mode refroidissement

Nom de la PACG	TR H V 009 (PSC Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.15574266
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.000145107
Puissance de référence (W)	3184
Puissance sensible de référence (W)	2094
Puissance nominale (W)	551
Nom de la PACG	TR H V 012 (PSC Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.188778982
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.00018927
Puissance de référence (W)	4457
Puissance sensible de référence (W)	2656
Puissance nominale (W)	781
Nom de la PACG	TR H V 024 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.377557963
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.00037854
Puissance de référence (W)	8714
Puissance sensible de référence (W)	5813
Puissance nominale (W)	1532
Nom de la PACG	TR H V 030 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.471947432
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.000473175
Puissance de référence (W)	10624
Puissance sensible de référence (W)	6844
Puissance nominale (W)	1833
Nom de la PACG	TR H V 060 (ECM Blower)
Débit volumique d'air de référence (m³/s)	0.920297503
Débit volumique d'eau de référence (m³/s)	0.00094635
Puissance de référence (W)	21516
Puissance sensible de référence (W)	11021

Tableau A I-4 Les coefficients en mode refroidissement

	Cx	Dx	Ex	RMS de la capacité de refroidissement (%)	RMS de la capacité sensible de refroidissement (%)	RMS du rejet de chaleur (%)	RMS de la puissance (%)
Nom de la PACG	TR H V 009 (PSC Blower)						
Coefficient 1	-2.5511263	1.7077394	-6.0705959	1.57	3.96	1.39	0.96
Coefficient 2	5.8609246	18.2450734	0.1263696				
Coefficient 3	-2.7514331	-18.5578637	6.7303063				
Coefficient 4	0.1272526	-1.33155114	0.20734010				
Coefficient 5	0.10559596	0.41742895	-0.26443382				
Coefficient 6		0.05694792					
Nom de la PACG	TR H V 012 (PSC Blower)						
Coefficient 1	-2.4502809	2.34249174	-4.9284319	1.55	4.67	1.4	1.15
Coefficient 2	5.88314647	17.6605976	0.09685753				
Coefficient 3	-2.8491441	-18.046732	5.58446685				
Coefficient 4	0.12469545	-1.8284833	0.20091017				
Coefficient 5	0.09078100	0.39502924	-0.1827762				
Coefficient 6		0.04348144					
Nom de la PACG	TR H V 024 (ECM Blower)						
Coefficient 1	-3.2534730	1.42189266	-7.1837196	1.31	3.86	1.34	1.59
Coefficient 2	6.05312245	18.3263443	0.11869377				
Coefficient 3	-2.2508308	-18.531572	7.77665413				
Coefficient 4	0.15522711	-1.2192641	0.25768109				
Coefficient 5	0.06385549	0.49805745	-0.3068781				

	Cx	Dx	Ex	RMS de la capacité de refroidissement (%)	RMS de la capacité sensible de refroidissement (%)	RMS du rejet de chaleur (%)	RMS de la puissance (%)
Coefficient 6		0.02275350					
Nom de la PACG	TR H V 030 (ECM Blower)						
Coefficient 1	-3.0769192	2.13833978	-5.9371070	1.42	4.48	1.35	1.34
Coefficient 2	6.00057428	17.8463238	0.10632464				
Coefficient 3	-2.3575752	-18.212369	6.59462227				
Coefficient 4	0.12507891	-1.6618177	0.19903456				
Coefficient 5	0.08475805	0.39646371	-0.2516975				
Coefficient 6		0.05581735					
Nom de la PACG	TR H V 060 (ECM Blower)						
Coefficient 1	-3.1805699	2.44245189	-6.0998356	1.34	4.42	1.34	1.55
Coefficient 2	6.05016326	22.4623346	0.10687296				
Coefficient 3	-2.2883603	-22.889078	6.71998138				
Coefficient 4	0.12575280	-1.8736146	0.22795252				
Coefficient 5	0.06375500	0.497982493	-0.2525111				
Coefficient 6		0.041030527					

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abolhassani, S. S., Amayri, M., Bouguila, N., & Eicker, U. (2022). A new workflow for detailed urban scale building energy modeling using spatial joining of attributes for archetype selection. *Journal of Building Engineering*, 46. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103661
- Adebisi, J. A., Kemp, S., & McArthur, J. (2024). HVAC system characterization for enhanced canadian existing buildings. *Ninth International IBPSA Conference*.
- AlAnzi, A., Seo, D., & Krarti, M. (2009). Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 822–828. doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.033
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2010). *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *Climatic Data for Building Design Standards*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation for acceptable indoor air quality*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2023). *Chapter 51: Service water heating. Dans ASHRAE Handbook - HVAC Applications*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (2023a). *Chap. 35: Ground-source heat pump and geothermal energy. Dans ASHRAE Handbook - HVAC Applications*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (2023b). *Measurement of energy, demand and water savings (ASHRAE Guideline 14)*.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (2025). *Chap. 19: Energy estimating and modeling methods. Dans ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*.
- Bernier, M., Neale, A., & Kummert, M. (2024). Development of archetypes to represent a residential building stock.

- Bernier, M., Neale, A., & Kummert, M. (2024). *Development of archetypes to represent a residential building stock*. présentée à eSim conference 2024: 13th Conference of IBPSA, Canada.
- Canada, C. n. d. r. d. (2020). *Code de construction du Québec, Chapitre I.1 – Efficacité énergétique du bâtiment, et Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada 2015 (modifié)*.
- Canadian Commission on Building and Fire Codes. (2011). *National Energy Code of Canada for Buildings: 2011*. doi: <https://doi.org/10.4224/40001272>
- CanmetENERGY. Building Technology Assessment Platform (BTAP). Repéré à https://github.com/canmet-energy/btap_batch#requirements
- Cerezo, C., Sokol, J., Reinhart, C., & Al-Mumin, A. (2015). Three methods for characterizing building archetypes in urban energy simulation. a case study in kuwait city. *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*.
- ClimateMaster. Tranquility® 16 (TR) Series: Submittal Data – Models TRH/V 006–060, 60 Hz, HFC-410A. In ClimateMaster. (Éd.).
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.007
- Consortium de recherche Schola. (2022). *L'ABC de la rénovation scolaire au Québec*. Université Laval. Repéré à https://www.schola.ca/telech/ABC_fasciculeA_2022.pdf
- Delcroix, B., Sansregret, S., Vanroy, K., Gavalda, O., Le Lostec, B., Kummert, M., . . . Chabot, C. (2026). *Archetype QC – Prototype Building Models for the Province of Quebec* présentée à eSim conference 2026: 14th Conference of IBPSA, Canada.
- Direction de l'accès à l'information, de la protection des renseignements personnels et de l'éthique. (2025a). *Capacité d'accueil d'une école primaire*.
- Direction de l'accès à l'information, de la protection des renseignements personnels et de l'éthique. (2025b). *Effectif scolaire de la formation générale des jeunes par école et adresse, selon le réseau d'enseignement, l'organisme responsable et le niveau scolaire, année scolaire 2024-2025*.

- Direction de l'accès à l'information et des plaintes Québec. (2023). *Effectif scolaire de la formation générale des jeunes par école et adresse, selon le réseau d'enseignement, l'organisme responsable et le niveau scolaire, année scolaire 2022-2023*.
- Gouvernement du Québec. (2026). Cibles institutionnelles en matière de lutte contre les changements climatiques pour 2030. Repéré à <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/reussir-ses-projets-transition-energetique/exemplarite-etat/cibles-resultats-institutions-reduction-ges/cibles-2030>
- Grasby, S. E., Allen, D. M., Bell, S., Chen, Z., Ferguson, G., Jessop, A., . . . Therrien, R. (2012). *Geothermal Energy Resource Potential of Canada*. Geological Survey of Canada. doi: 10.4095/291488
- Gunawan, E. (2019). *Alternative heating systems for northern remote communities: Techno-economic analysis of ground-source heat pumps in Kuujuaq, Nunavik, Canada* (Institut national de la recherche scientifique (INRS)).
- Hepting, C. (2020). *Energy Codes Performance Assessment of ASHRAE 90.1 and the NECB* présentée à eSim conference 2020: 11th Conference of IBPSA, Canada. Repéré à https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=esim2020_1251
- Hydro-Québec. (2022). *Plan d'approvisionnement 2023-2032*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/achats-electricite-quebec/pdf/plan-dapprovisionnement-2023-2032.pdf>
- Hydro-Québec. (2023). *Plan d'action 2035—Vers un Québec décarboné et prospère*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/a-propos/pdf/plan-action-2035.pdf>
- Hydro-Québec. (2025a). *Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes nord-américaines*. Repéré à <https://hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/comparaison-prix-electricite-2025.pdf>
- Hydro-Québec. (2025b). *Tarifs d'électricité 2025*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/tarifs-electricite.pdf?v=HT-2025-v3>
- Hydro-Québec. (2026a). *L'hydroélectricité québécoise : propre, renouvelable et faible en GES*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/a-propos/notre-energie.html>
- Hydro-Québec. (2026b). *Options de gestion de la demande de puissance*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/affaires/espace-clients/tarifs/options-gestion-demande-puissance.html>

- Hydro-Québec. (2026c). Qu'arrive-t-il lorsque la consommation d'électricité dépasse la capacité du réseau ? Repéré à <https://www.hydroquebec.com/residentiel/mieux-consommer/offres-pour-economiser-cet-hiver/capacite-reseau.html>
- Hydro-Québec. (2026d). Systèmes géothermiques. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/residentiel/mieux-consommer/conseils/fenetres-chauffage-climatisation/geothermie.html>
- Ido, É. I. (2020). *Inventaire et analyse du stockage thermique dans le parc immobilier institutionnel québécois*. (École de technologie supérieure, Canada).
- Jadaa, D. A., & McArthur, J. J. (2024). Development of Granular Archetypes for Canadian Existing Commercial Office and Multi-Unit Residential Buildings in Climate Zone 5.
- Kharseh, M., Altorkmany, L., Al-Khawaja, M., & Hassani, F. (2015). Analysis of the effect of global climate change on ground source heat pump systems in different climate categories. *Renewable Energy*, 78, 219–225. doi: 10.1016/j.renene.2015.01.017
- Laroche, M., Monfet, D., & D'Avignon, K. (2024). *Evaluating the potential of electric thermal storage devices to manage greenhouse peak heating demand in cold climates*. présentée à eSim conference 2024: 13th Conference of IBPSA. Repéré à <https://publications.ibpsa.org/conference/?id=esim2024>
- Lazzari, S., Priarone, A., & Zanchini, E. (2010). Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement. *Energy*, 35(12), 4966–4974. doi: 10.1016/j.energy.2010.08.028
- Lee, E. S. (2013). *An improved hydronic loop system solution algorithm with a zone-coupled horizontal ground heat exchanger model for whole building energy simulation* (Oklahoma State University).
- Liravi, M., Karkon, E., Jamot, J., Wemhoener, C., Dai, Y., & Georges, L. (2024). Energy efficiency and borehole sizing for photovoltaic-thermal collectors integrated to ground source heat pump system: A Nordic case study. *Energy Conversion and Management*, 313. doi: 10.1016/j.enconman.2024.118590
- Maranghi, F. M. R. (2022). *Conception, dimensionnement et fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique à assistance solaire pour les communautés nordiques du Nunavik*.
- Mattsson, M., Danielski, I., Olofsson, T., & Nair, G. (2025). Archetypes-based calibration for urban building energy modelling. *Energy and Buildings*, 343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115843>

- Ministère de l'Éducation. (2017). Données ouvertes du MEQ-MES. Repéré à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/localisation-des-etablissements-d-enseignement-du-reseau-scolaire-au-quebec/resource/5d254f95-5ebd-474a-bdc2-59db68ae1e33>
- Mootamri, W. (2025a). *Archétype proposé pour tester l'implémentation du couplage entre la géothermie et l'accumulateur thermique central dans les écoles primaires québécoises. (Rapport interne)*. Hydro-Québec.
- Mootamri, W. (2025b). *Description du modèle archétype pour évaluer le couplage d'accumulateur thermique électrique avec la géothermie dans les écoles primaires au Québec. (Rapport interne)*. Hydro-Québec.
- Mootamri, W., Laurencelle, F., & D'Avignon, K. (2026). *Potential of electric thermal storage as auxiliary to ground coupled heat pump system* présentée à eSim conference 2026: 14th Conference of IBPSA, Canada.
- Morovat, N. (2024). *Model-Based Predictive Control Strategies and Renewable Energy Integration for Energy Flexibility Enhancement in School Buildings*. (Concordia University, Canada).
- National Institute of Standards and Technology. (2019). *Airflow and indoor air quality models of DOE prototype commercial buildings*. National Institute of Standards and Technology. doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2072>
- Olsthoorn, D., Haghighat, F., Moreau, A., & Lacroix, G. (2017). Abilities and limitations of thermal mass activation for thermal comfort, peak shifting and shaving: A review. *Building and Environment*, 118, 113–127. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.03.029
- Ouf, M., Issa, M., & Merkel, P. (2016). Analysis of real-time electricity consumption in Canadian school buildings. *Energy and Buildings*, 128, 530–539. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.022
- Parekh, A. (2005). Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses. *Ninth International IBPSA Conference*.
- Piemontese, L., Neudert, R., Oberlack, C., Pedde, S., Roggero, M., Buchadas, A., . . . Sietz, D. (2022). Validity and validation in archetype analysis: practical assessment framework and guidelines. *Environmental Research Letters*, 17(2). doi: 10.1088/1748-9326/ac4f12

- Pristerà, G., Allacker, K., Rock, M., & Sala, S. (2023). Archetype selection process for the development of a building stock model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1). doi: 10.1088/1755-1315/1196/1/012013
- Québec, B. (2025). Appel à la participation - Projet de recherche Archétype QC. Repéré à <https://www.boma-quebec.org/infolettre-en-details/2024-05-01/boma-info-mai-2024/appel-a-la-participation-projet-de-recherche-archEtype-qc>
- Régie de l'énergie du Canada. (2023). *Avenir énergétique du Canada - Résultats*. Repéré à <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/avenir-energetique-canada/2023/resultats/>
- Saleem, A., Ambreen, T., & Ugalde-Loo, C. E. (2024). Energy storage-integrated ground-source heat pumps for heating and cooling applications: A systematic review. *Journal of Energy Storage*, 102. doi: 10.1016/j.est.2024.114097
- Sansregret, S., & Millette, J. (2009). *Development of a functionality generating simulations of commercial and institutional buildings having representative characteristics of a real estate stock in québec (canada)*. présentée à Eleventh International IBPSA Conference.
- Shi, H., & Chen, Q. (2021). Building energy management decision-making in the real world: A comparative study of HVAC cooling strategies. *Journal of Building Engineering*, 33. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101869
- Sokol, J., Cerezo Davila, C., & Reinhart, C. F. (2017). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 134, 11–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- Steffes Corporation. Fiche technique ThermElec hydronique modèles 9150 et 9180.
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. doi: 10.1016/j.rser.2008.09.033
- Tremblay-Lemieux, S. (2019). *Vers une caractérisation du parc immobilier des écoles primaires publiques du Québec : Une exploration de la combinaison des méthodes d'analyse de la typomorphologie et de la syntaxe spatiale*.
- U.S. Department of Energy. (2011). *Commercial reference building models of the national building stock*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). doi: <https://doi.org/10.2172/1009264>

- U.S. Department of Energy. (2021). EnergyPlus parametric Spreadsheets for HeatPump WatertoWater WatertoAir. Repéré à <https://energyplushelp.freshdesk.com/support/solutions/articles/67000688146-parametric-spreadsheets-for-heatpump-watertowater-watertoair>
- U.S. Department of Energy. (2022). *EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation - Engineering Reference*.
- Vanroy, K. (2022). *Developing a prototype building energy model for a Quebec primary school and assessing the importance of detailed HVAC system modeling*. (Polytechnique Montréal, Canada).
- Vanroy, K. (2023). *Caractérisation des écoles primaires d'un point de vue énergétique et développement d'un premier archétype pour une école primaire représentative de la typologie la plus fréquente. (Rapport interne)*.
- Vanroy, K. (2024). *Caractérisation des écoles primaires et secondaires d'un point de vue énergétique et développement des archétypes. (Rapport interne)*.
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2026). *État de l'énergie au Québec 2026*. Montréal, QC: Chaire de gestion du secteur de l'énergie - HEC Montréal. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2026/02/EEQ2026_web.pdf
- Xing, L. (2014). *Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling*. (Oklahoma State University).
- Younes, H. E., Laurencelle, F., & D'Avignon, K. (2023). Repéré à Zenodo.doi:10.5281/zenodo.10215082.
- Younes, H. E., Laurencelle, F., & D'Avignon, K. (2024). *Implementing Thermal Electric Storage in EnergyPlus through an OpenStudio Measure* présentée à eSim conference 2024: 13th Conference of IBPSA, Canada. Repéré à <https://publications.ibpsa.org/conference/?id=esim2024>