



Le génie pour l'industrie

STOCKAGE THERMIQUE ET EXEMPLARITÉ DE L'ÉTAT

Résultats de l'étude, constats et recommandations

Katherine D'Avignon, Ing., Ph. D.
Département de génie de la construction
École de technologie supérieure

Réalisé pour le compte de Transition énergétique Québec

Rapport final

Mars 2022

Rév. 15 mars 2022

Remerciements et note sur les auteurs

Le rapport fut préparé par :

- Katherine D'Avignon, ing., Ph. D. - professeure associée en génie de la construction à l'École de technologie supérieure et co-directrice du Laboratoire de thermique et de science du bâtiment.
- Vincent Chabot, CPI - étudiant à la maîtrise en génie, énergies renouvelables et en efficacité énergétique à l'École de technologie supérieure.

La rédaction de cet ouvrage a été rendue possible grâce aux efforts de plusieurs étudiants-chercheurs œuvrant à l'analyse des sites, soit en ordre alphabétique :

Milena Kalzou Baré,

Julien Charbonneau,

Sullivan Danjou,

Julien Drouet,

Eyé Imelda Ido,

Abdelkrim Makhlouf, et

Eve Patricia Ngangsop Ngopjop.

L'équipe de recherche souhaite également remercier le personnel des dix centres de services scolaires ayant donné de leur temps pour ce projet tant comme participant aux entrevues, qu'en supportant la collecte d'informations sur les sites et de données d'opération des accumulateurs.

Nos remerciements sincères au personnel de Newtech Électricité et de la direction de l'exploitation des immeubles de la Société québécoise des infrastructures (SQI) ayant accepté de partager leur expérience d'opération et d'entretien des accumulateurs ; à l'équipe de l'expertise énergétique d'Hydro-Québec qui a permis l'accès aux données de puissance appelée des sites ; au personnel technique de Steffes Corporation qui a généreusement répondu à nos questions sur les paramètres de sorties des appareils dans leurs milles et une configuration ; à messieurs Réal Audet et Patrick Moisan de Contrôles AC Inc. sans qui la campagne de mesure de l'hiver 2020-2021 n'aurait pas eu lieu ; aux multiples ingénieurs et professionnels de Bouthillette Parizeau, Ecosystem, EXP, GBI, Johnson Controls, LGT et Ponton Guillot qui ont accepté de partager leur expérience de conception de réseaux de chauffage équipés d'accumulateurs.

Finalement, nos remerciements sincères à Michel Fournier et ses collègues de Transition énergétique Québec pour le soutien à ce projet.

L'équipe de recherche vous remercie.

Résumé

Dans sa lutte contre les changements climatiques, le Gouvernement du Québec s'est engagé à agir lui-même de façon exemplaire de façon à ce que l'État québécois trace la voie de la transition énergétique. Le souhait d'Exemplarité de l'État exige des efforts continus des institutions afin de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et d'intégrer l'efficacité énergétique et l'utilisation prioritaire de l'énergie renouvelable dans leur culture organisationnelle.

La réduction ou même d'élimination des combustibles fossiles dans le chauffage de l'eau et de l'air des bâtiments institutionnels affectera l'appel de puissance de ceux-ci sur le réseau électrique en période hivernale. Le déploiement de technologies de stockage thermique peut s'avérer un outil pour favoriser cette transition, permettant de réduire les pointes de demande sur le réseau électrique et la facturation énergétique des bâtiments et d'augmenter la part des énergies renouvelables dans leur portefeuille énergétique.

C'est dans ce contexte que Transition énergétique Québec a mandaté l'équipe de recherche, composée de chercheurs du Laboratoire de thermique et de science du bâtiment (ItsB) de l'École de technologie supérieure, d'étudier les technologies de stockage thermique actuellement déployées dans les bâtiments institutionnels québécois de façon à documenter l'expérience passée et d'en soutirer les conditions de succès afin de s'assurer de faire des choix judicieux et éviter de passer à côté d'opportunités d'améliorer le comportement énergétique de ces bâtiments.

Dans une première phase, les technologies de stockage thermique existantes dans les centres de services scolaires (CSS) ont été répertoriées. Les bâtiments visés incluaient ceux dans lesquels une technologie de stockage thermique était présentement fonctionnelle ou prévue au cours d'année et ceux où une technologie de stockage thermique avait été installée puis démantelée ou mise hors service. Un total de 156 bâtiments ont été répertoriés entre les dix (10) centres de services scolaires (CSS) ayant répondu à l'appel. Les technologies répertoriées incluent : les accumulateurs thermiques électriques, les réservoirs de matériaux à changement de phase, le stockage souterrain (aquifères et puits géothermiques) et les stratégies de contrôles visant à exploiter la masse thermique des bâtiments. Les caractéristiques générales des bâtiments concernés (année de construction, occupation, superficie, nature du système de chauffage, etc.) ont été recensées ainsi que les caractéristiques du stockage thermique qui s'y trouve (type, capacité, usage, etc.). Cet inventaire a souligné la dominance des accumulateurs thermiques électriques parmi les technologies répertoriées, soit la technologie sur laquelle s'est concentrée les phases suivantes.

Dans une deuxième phase, des entrevues ont été réalisées avec des gestionnaires immobiliers, des opérateurs de bâtiments institutionnels et des concepteurs de systèmes CVCA ayant participé à des projets d'accumulateurs thermiques électriques en milieu institutionnel. Les premières entrevues ont permis de statuer que la plupart des installations avaient été faites dans un contexte d'une transition des systèmes de chauffage hydroniques des énergies fossiles vers l'électricité et de répertorier les circonstances qui ont mené à l'adoption des accumulateurs comme solution technologique. Celles-ci ont également permis de documenter la perception des gestionnaires et les bonnes pratiques vis-à-vis du processus d'acquisition d'accumulateurs. Les entrevues avec les opérateurs ont permis de faire ressortir leur expérience d'entretien, de maintenance et d'opération de ces appareils alors que les entrevues avec les concepteurs ont mis en lumière les enjeux liés à l'inclusion d'appareils de stockage thermique dans un réseau de chauffage. L'ensemble des propos rapportés ont permis d'identifier les bonnes pratiques à mettre en place dans de futurs projets de réfection de chaufferies.

Dans une troisième phase, les données d'opérations d'un sous-groupe de bâtiments ont été exploitées pour produire des données probantes sur l'opération, la rentabilité et impact énergétique des accumulateurs. Une modélisation du comportement des accumulateurs thermiques, calibrée sur ces données d'opération, a permis de simuler des scénarios alternatifs où l'accumulateur serait remplacé par une autre technologie connue afin de pouvoir statuer sur la performance relative des accumulateurs. En comparaison avec l'option de la biénergie, les accumulateurs ont permis une transition énergétique vers les énergies renouvelables et une réduction significative des émissions de GES (13 à 36 tonnes d'équivalent de CO₂) sans occasionner d'augmentation significative de la pointe saisonnière (-5 kW, 0 kW et +35 kW pour des capacités installées de 160 à 240 kW) et un maintien ou une réduction de la facturation énergétique saisonnière (-1000\$ à +250\$).

En comparaison avec l'installation de chaudières électriques (scénario « 100% électrique »), les accumulateurs permettent une forte réduction de la puissance de pointe saisonnière (19 kW à 68 kW) et une réduction de la facture saisonnière dans cinq (5) des sites étudiés. Ces données ont permis de souligner la contribution des accumulateurs à la réduction de la pointe de puissance appelée, la facturation énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre des différents projets étudiés.

Les résultats présentés dans ce rapport et les données de performances résultantes permettront aux gestionnaires et opérateurs de bâtiments institutionnels de mieux appréhender l'impact de l'ajout d'un accumulateur thermique dans leur bâtiment. Les bonnes pratiques dirigées vers les gestionnaires, opérateurs et concepteurs, assureront le succès des implémentations futures. Les recommandations dirigées aux différentes parties prenantes permettront de mettre en place les outils nécessaires pour faciliter le déploiement de technologies de stockage dans le futur.

Liste des bonnes pratiques

Bonne pratique 1 :

Sélectionner des professionnels en conception, commande-contrôle et des entrepreneurs qui ont une expérience avec les accumulateurs thermiques électriques.

Bonne pratique 2 :

Exiger une mise en service améliorée durant la 1^{re} année, impliquant tant le concepteur que le fournisseur, et ce aux frais du soumissionnaire.

Bonne pratique 3 :

Que les opérateurs et professionnels emploient une prévision de la température extérieure minimale anticipée le jour suivant plutôt que la température actuelle pour fixer le niveau d'énergie ciblé des ATC.

Bonne pratique 4 :

Que les opérateurs et les professionnels s'assurent de ne pas maintenir l'ATC à haute température (>700°C) pendant des périodes prolongées.

Bonne pratique 5 :

Que les opérateurs et les professionnels prévoient une séquence de contrôle spécifique permettant la gestion automatisée des événements hors du fonctionnement normal du bâtiment.

Bonne pratique 6 :

Que des séquences exploitant les extrants de l'accumulateur soient implémentées dans le BMS et son interface pour détecter et diagnostiquer les défaillances de composants, tels les éléments chauffants et le moteur du ventilateur.

Bonne pratique 7 :

Que la stratégie de contrôle ne porte pas le ventilateur de l'ATC à fonctionner à bas régime pendant une durée prolongée, dans le but de maximiser la durée de vie du moteur.

Bonne pratique 8 :

Que les opérateurs utilisant l'ATC comme source principale de chauffage prévoient garder un moteur de ventilateur en inventaire pour un remplacement curatif imprévisible.

Bonne pratique 9 :

Que les opérateurs priorisent la vérification de l'état des éléments chauffants via le panneau électrique plutôt qu'en ouvrant l'appareil.

Bonne pratique 10 :

Que les opérateurs prévoient les ressources nécessaires pour effectuer des interventions de maintenance préventive de façon annuelle, en fonction des pratiques recommandées dans la fiche présentée en annexe.

Bonne pratique 11 :

Que les concepteurs exploitent, lorsque possible, l'historique de données du BMS afin de mieux comprendre l'opération du réseau de chauffage existant et d'évaluer avec plus de précision la puissance de chauffage requise et l'énergie à accumuler.

Bonne pratique 12 :

Que les gestionnaires et opérateurs de bâtiments prévoient l'ajout de mesurage sur les réseaux de chauffage existants (débit et température) pour lesquels ils planifient une réfection de la chaufferie afin de mieux outiller les concepteurs.

Bonne pratique 13 :

Que les concepteurs transmettent clairement leur intention derrière la conception (l'utilisation prévue de l'ATC, les paramètres de la stratégie de contrôle à ajuster au fil des saisons d'opération et ceux à ne pas modifier, ainsi que l'importance d'optimiser la séquence de contrôle) aux opérateurs via la documentation du projet.

Bonne pratique 14 :

Que les concepteurs spécifient aux plans et devis l'utilisation des extrants de l'ATC et l'instrumentation externe nécessaire pour détecter et diagnostiquer les défaillances et/ou bris de composants et en avertir les opérateurs via l'interface du BMS.

Bonne pratique 15 :

Que les opérateurs effectuent une révision périodique de la puissance de délestage mensuelle en fonction de la rigueur de l'hiver anticipé ou de toute amélioration écoénergétique effectuée pouvant réduire la puissance électrique appelée du bâtiment.

Bonne pratique 16 :

Que l'horaire d'occupation du bâtiment soit considéré dans le développement de la stratégie de contrôle de l'ATC de façon à limiter la charge de celui-ci avant une période d'inoccupation prolongée.

Liste des recommandations

Recommandation 1 :

Que le fabricant supplémente sa documentation technique d'une explication détaillée des divers modes de fonctionnement offerts par l'accumulateur et/ou propose des combinaisons de paramètres recommandées pour divers modes d'opération attendus.

Recommandation 2 :

Que des séquences exploitant les extrants de l'accumulateur soient développées pour détecter et diagnostiquer les défaillances de composants tels les éléments chauffants et le moteur du ventilateur et rendues disponibles aux opérateurs.

Recommandation 3 :

Qu'un outil simplifié soit développé et rendu disponible aux concepteurs afin de leur permettre de quantifier le potentiel d'un accumulateur à réduire la puissance appelée et la facturation énergétique d'un bâtiment, au moment de la conception préliminaire.

Recommandation 4 :

Que les programmes de subvention disponibles pour l'implantation d'un accumulateur soient activement publicisés auprès des firmes de génie-conseil, des ESE et des gestionnaires de bâtiments institutionnels.

Recommandation 5 :

Que des courbes de performance, indiquant la puissance de décharge disponible selon le niveau d'énergie stockée et la durée de la décharge, soient rendues accessibles aux concepteurs.

Recommandation 6 :

Qu'un outil de modélisation simplifié de l'ATC soit développé pour aider les concepteurs à mieux établir la courbe d'énergie ciblée et le point de consigne de délestage dès la conception détaillée, afin de réduire la durée de la période de rodage de la séquence de contrôle.

Recommandation 7 :

Qu'un outil permettant de faire un ajustement automatique de la puissance mensuelle de délestage soit développé et rendu accessible aux opérateurs.

Table des matières

Chapitre 1 – Introduction	11
1.1 Contexte et problématique.....	11
1.1.1 Qu'est-ce que le stockage thermique ?.....	11
1.1.2 Enjeux d'implantation de stockage thermique	11
1.2 Objectifs	12
1.3 Limite de l'étude	13
1.4 Méthodologie globale et structure du rapport	13
Chapitre 2 – Inventaire des sites	15
2.1 Sites répertoriés.....	15
2.2 Technologies de stockage thermique recensées	16
2.3 Bâtiments retenus.....	21
Chapitre 3 - Synthèse des entretiens.....	27
3.1 Gestion de projet et acquisition.....	27
3.1.1 Entretiens des gestionnaires de projets	27
3.2 Opération et maintenance.....	30
3.2.1 Opération des accumulateurs	31
3.2.2 Maintenance des accumulateurs	35
3.3 Conception.....	40
3.3.1 Conception préliminaire.....	42
3.3.2 Conception détaillée	44
Chapitre 4 – Description des sites de l'étude détaillée	50
4.1 Configuration des réseaux de chauffage.....	50
4.2 Contrôle des accumulateurs	53
4.2.1 Stratégies de charge et décharge.....	54
4.2.2 Niveau d'énergie ciblé.....	56
4.2.3 Conclusions émanant de l'étude des stratégies de commande.....	58
Chapitre 5 – Performance des ATC.....	59
5.1 Méthodologie de calcul.....	59
5.2 Scénario de substitution	60
5.3 Financement	61
5.4 Résultats et analyse	62
Conclusion	65
Références.....	67
ANNEXE 1 – Appel à participer	68
ANNEXE 2 – Fiche synthèse – Entretien préventif.....	71
ANNEXE 3 – Fiche synthèse – Performance des sites.....	73

Liste des figures

Figure 1: Exemple de courbe de performance d'un dispositif de stockage thermique.	12
Figure 2: Exemple de commande prédictive	12
Figure 3: Nombre de bâtiments répertoriés suite à l'appel à participer	16
Figure 4: Composants d'un accumulateur thermique central (type hydronique)	18
Figure 5: Composants d'un accumulateur thermique central (type à air forcé)	18
Figure 6: Composants d'un accumulateur thermique local (ATL).	19
Figure 7: Superficie des bâtiments d'intérêt (n=121)	23
Figure 8: Répartition de l'année de construction des bâtiments d'intérêts (n=121).	24
Figure 9: Répartition de l'année de construction de 2158 bâtiments scolaires québécois du cycle primaire.	24
Figure 10: Répartition des sources d'énergie avant et après l'installation du stockage (n=100).	25
Figure 11: Répartition des sources d'énergie avant et après l'installation du stockage (n=100).	26
Figure 12: Vitesse du ventilateur de l'ATC1, site #3, 17 au 20 janvier 2021	37
Figure 13: Fréquence horaire d'opération de l'accumulateur du site #10, opéré en déplacement de pointe	54
Figure 14: Profil typique d'opération de l'ATC des sites #2 et #16 pour des jours de semaine, opéré en nivelage de charges	55
Figure 15: Opération d'un accumulateur ThermElect9150 sur la base d'une consigne mensuelle de niveau de charge (site #18). ..	57

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition des bâtiments répertoriés selon les technologies et la catégorie de chaque site	17
Tableau 2: Bâtiments retenus pour l'étude détaillée	22
Tableau 3: Nature d'utilisation des bâtiments de l'échantillon (n=121)	23
Tableau 4: Caractéristiques des participants aux entrevues – volet approvisionnement	28
Tableau 5: Caractéristiques des participants aux entrevues - volet opération et maintenance	30
Tableau 6: Informations sur les remplacements de composants des accumulateurs tirées des entrevues O&M	35
Tableau 7: Caractéristiques des participants aux entrevues – volet conception	41
Tableau 8: Configuration des réseaux de chauffage et source principale	52
Tableau 9: Coût des sources énergétiques et leurs émissions de GES respectives	61
Tableau 10: Détails des programmes d'appui financier	62
Tableau 11: Sommaire des résultats de performances des ATC	63
Tableau 12: Résumé des scénarios de comparaison des sites	64
Tableau A-13 : Voltages attendus des thermocouples dans les noyaux de briques	71
Tableau A-14: Courant appelé par les éléments chauffants lors de la charge des trois noyaux de briques	72
Tableau A-15: Résistance électrique attendue des éléments chauffants	72

Nomenclature

ATC	Accumulateur thermique électrique central
BMS	Système de gestion du bâtiment (<i>Building management system</i> , en anglais)
CO ₂ e	CO ₂ équivalent
COP	Coefficient de performance
CSS	Centre de services scolaires
EEG	Économie d'énergie garantie
ESE	Entreprise de services écoénergétiques
GES	Gaz à effet de serre
n. a.	Non applicable
n. d.	Non disponible
PACC 2020	Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020
PEV 2030	Plan pour une économie verte 2030
PRI	Période de retour sur investissement
t. éq. CO ₂	Tonne d'équivalent dioxyde de carbone
VAN	Valeur actuelle nette

Chapitre 1 – Introduction

1.1 Contexte et problématique

Le Gouvernement du Québec s'est engagé dans la lutte contre les changements climatiques et a, pour ce faire, pris des engagements ambitieux demandant la participation des citoyens, des entreprises et des institutions. L'exemplarité de l'État exige des efforts continus de ce dernier groupe afin de réduire les émissions de GES et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments gouvernementaux. Cela inclus, entre autres, de réduire ou même d'éliminer l'usage des combustibles fossiles dans le chauffage de l'eau et de l'air des bâtiments institutionnels et de prioriser l'utilisation de l'énergie renouvelable.

Or, présentement, malgré que l'électricité québécoise soit renouvelable, abordable et facilement disponible, seulement 58% de l'énergie consommée dans le secteur des bâtiments commerciaux et institutionnels est renouvelable. Puisque la structure tarifaire de l'électricité québécoise pénalise les pointes d'appel de puissance, l'utilisation de celle-ci pour le chauffage de l'eau et des locaux est souvent onéreuse pour les bâtiments institutionnels. Ceux-ci se tournent alors vers les combustibles fossiles pour desservir leurs besoins de chauffage, surtout en période de pointe. Le déploiement de technologies de stockage thermique peut s'avérer un outil fort utile à cette fin, permettant d'augmenter la part des énergies renouvelables dans leur portefeuille énergétique sans tout en limitant les pointes de demande sur le réseau électrique et la facturation énergétique des bâtiments.

1.1.1 Qu'est-ce que le stockage thermique ?

Le concept du stockage thermique est le principe d'entreposer de l'énergie sous forme de chaleur ou de froid pour un usage ultérieur. Différentes technologies sont disponibles et seront habituellement classifiées selon le matériau utilisé pour stocker la chaleur et la durée de stockage requise. Par exemple, de la chaleur peut être stockée dans un matériau solide comme des briques, dans un liquide (p.ex. eau, huile), des matériaux à changement de phase ou encore dans une formation géologique tel un aquifère. Autant la taille du stockage que la technologie sélectionnée sera influencée par la durée anticipée entre les phases de charge et décharge, pouvant aller de quelques heures, à des jours, ou même des mois, et par l'échelle du besoin desservie (réseau, bâtiment, quartier, ville).

Dans le cas présent, les bâtiments institutionnels recherchent une technologie qui leur permettra d'atténuer leur pointe électrique journalière ou encore saisonnière et celles-ci sont largement dues au chauffage. La recherche a démontré que le stockage de chaleur, à la fois saisonnier et journalier, peut réduire ces pointes de demande et ainsi permettre d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le portefeuille énergétique des bâtiments. L'offre de produits (accumulateurs thermiques, réservoirs de matériaux à changement de phase, stockage intersaisonnier, etc.) est variée et peut s'intégrer favorablement dans une panoplie de systèmes et applications. Le stockage thermique mériterait donc d'être considéré plus souvent comme outil de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) en facilitant la transition énergétique des bâtiments à moindre coût.

1.1.2 Enjeux d'implantation de stockage thermique

Les principaux enjeux d'implantation rattachés au stockage thermique émanent du changement de paradigme qu'il impose tant au niveau du dimensionnement que de la commande-contrôle, en comparaison d'appareils de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA) traditionnels. La capacité d'un dispositif de stockage thermique varie en fonction du niveau actuel d'énergie stockée, qui est directement lié à la température actuelle du matériau de stockage. La Figure 1 illustre un exemple de courbe de performance pour un dispositif de stockage thermique. On y voit que la puissance disponible pour la décharge de chaleur dans le réseau de chauffage dépendra directement du niveau d'énergie actuel de l'appareil et conséquemment, un choix judicieux du **niveau d'énergie ciblée** (c.-à-d. la température du matériau) est primordial.

Un système de stockage requiert un certain temps pour se charger jusqu'au niveau d'énergie ciblée, ce dernier doit donc être fixé non pas en fonction des besoins thermiques actuels, mais en fonction de ceux à venir dans 6, 12 ou même 24 heures. Tel qu'illustré à la Figure 2, ceci requiert une capacité d'estimer la puissance requise en décharge sur un certain horizon de prédiction et donc une commande qui tient compte d'une prédiction des besoins ; une **commande prédictive**. En effet, tout système de stockage thermique fonctionne à deux échelles de temps distinctes : le stockage de chaleur (la charge du dispositif) doit être opéré de manière prévisionnelle alors la distribution de la

chaleur (la décharge du dispositif) peut se contrôler en temps réel, similairement à d'autres appareils CVCA. Pour un système de chauffage, une relation simple peut généralement être tracée entre la température extérieure et les besoins de chauffage, permettant une estimation des besoins futurs sur la base d'une prédiction de la température minimale anticipée dans les 24 heures suivantes.

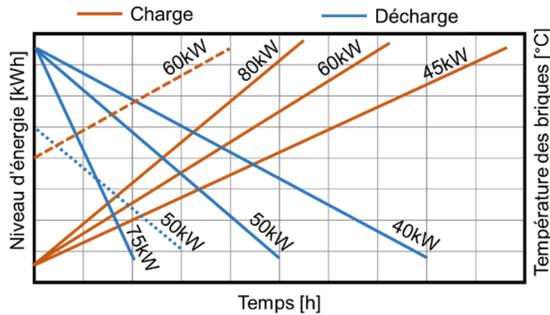


Figure 1: Exemple de courbe de performance d'un dispositif de stockage thermique.

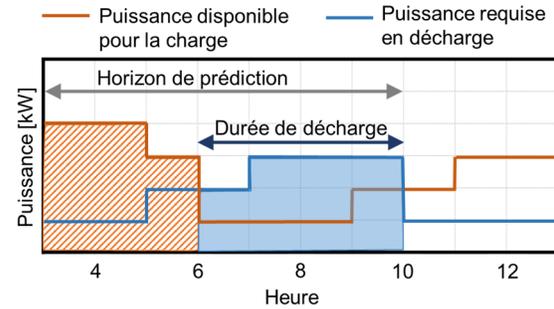


Figure 2: Exemple de commande prédictive

L'autre paramètre essentiel au dimensionnement est la **durée de la décharge**. La Figure 1 illustre qu'une puissance de décharge donnée n'est disponible que pour une durée fixe, sans que le dispositif de stockage n'ait à être chargé de nouveau. Contrairement, aux autres appareils de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA), les systèmes de stockage thermique doivent être dimensionnés pour répondre à la somme des besoins durant la période de décharge anticipée et non uniquement le besoin horaire maximal annuel ; l'appareil doit donc être dimensionné sur la base de l'énergie requise durant la période de décharge et non seulement de la puissance maximale. La longueur de la période de décharge dépendra de la fonction du système et il est donc nécessaire de définir celle-ci (p. ex. opération en **déplacement de pointe** ou comme **source principale** de chauffage) dès la conception, car ce choix influencera le dimensionnement. Par exemple, pour une opération en **déplacement de pointe**, la durée de la décharge sera habituellement de 3 ou 4 heures¹ par jour alors que pour une unité opérée comme **source principale** de chauffage, il faudra considérer une décharge continue de 24 heures par jour. Pour bien dimensionner un système de stockage, un concepteur devra donc calculer un profil horaire précis des besoins et analyser celui-ci sur la durée de la période de décharge anticipée.

Bien que le stockage thermique soit employé dans le domaine du bâtiment depuis des décennies, il est encore considéré comme une « innovation » par la plupart des gestionnaires et donc associé à un haut risque d'échec. Peu de cas réels ont été documentés, ce qui laisse planer un doute sur la performance, la rentabilité et la complexité de ces technologies. Or, entre les risques de méconnaissance de la technologie et le défi de pérenniser les gains, peu de gestionnaires demandent que du stockage thermique soit inclus dans leurs projets de réfections et rares sont les professionnels qui en proposent. Malgré l'important potentiel du stockage comme levier de transition énergétique des bâtiments, son déploiement demeure faible dans le parc immobilier québécois.

Afin de respecter les orientations du gouvernement, de s'assurer de faire des choix judicieux et pour éviter de passer à côté d'opportunités d'améliorer le comportement énergétique de ses bâtiments, il est nécessaire d'étudier les technologies de stockage thermique actuellement déployées dans les bâtiments institutionnels québécois de façon à documenter l'expérience passée et en soutirer les conditions de succès. C'est pourquoi, Transition énergétique Québec a mandaté une équipe de chercheurs du Laboratoire de thermique et de science du bâtiment (ItsB) de l'École de technologie supérieure de conduire un projet de recherche à cette fin.

1.2 Objectifs

Le principal objectif du projet était de fournir des données probantes sur l'utilisation du stockage thermique aux gestionnaires et opérateurs de bâtiments institutionnels afin d'assurer un déploiement efficace de la technologie pour appuyer la transition énergétique des bâtiments institutionnels. Afin de produire ces données probantes, cinq (5) objectifs spécifiques sont nécessaires, soient :

¹ Les pointes quotidiennes sur le réseau d'Hydro-Québec se produisent en semaine, le matin entre 6 h et 9 h et en fin de journée entre 16 h et 20 h.

- Détailler les technologies de stockage thermique existantes dans le parc immobilier institutionnel et leur fonctionnement,
- Produire des données probantes sur leur opération, rentabilité et impact énergétique (énergie, puissance, émissions de GES évités) ;
- Documenter comment le processus d'acquisition, d'implémentation et d'opération des accumulateurs thermiques électriques fut vécu dans le passé ;
- Documenter en vue de recommander les conditions nécessaires à l'implémentation des accumulateurs et supporter la prise de décision éclairée ; et
- Décrire les caractéristiques des bâtiments pour lesquels ces technologies seraient d'intérêt.

1.3 Limite de l'étude

Une priorité du mandat était de produire des données probantes sur la performance d'accumulateurs installés dans des sites institutionnels. Pour ce faire, des données d'opération devaient être extraites du système de gestion du bâtiment (*Building Management System* ou BMS en anglais) en plus des données de puissance appelée des bâtiments, fournies par Hydro-Québec. Le contexte de la pandémie ayant limité les déplacements, les visites de vérifications et de mesurage sur site ont dû être suspendues. La priorité a été donnée à l'obtention d'un bilan énergétique cohérent pour chacun des appareils par la calibration. Dans certains cas, cette approche fut insuffisante pour assurer une cohérence globale pour l'appareil. Bien qu'une phase de vérification de l'intégrité des éléments chauffants est en cours auprès des centres de services scolaires (CSS), la cause de certaines anomalies n'a pu être confirmée. Conséquemment, certains appareils et certains sites ont dû être exclus de l'analyse.

Afin rendre les résultats généralisables à d'autres bâtiment, il est nécessaire de pouvoir présenter les sites étudiés à travers un nombre limité de caractéristiques tels leur superficie, leur usage, la nature de leur occupation et besoins, etc. Ayant concentré l'étude sur des bâtiments relativement âgés du parc immobilier scolaire (> 30ans) ceux-ci comportent parfois plusieurs pavillons, 2 ou 3 chaufferies et jusqu'à 4 compteurs électriques. Il fut impossible de confirmer avec exactitude les charges thermiques desservies par chacune des boucles de chauffage. Les pavillons étant interconnectés, les superficies desservies par une chaufferie plutôt qu'une autre se confondent également. En conséquence, il n'a pas été possible de traiter chaque pavillon comme un bâtiment distinct associé à un seul compteur ou de réconcilier les différentes portions de bâtiment desservir par un compteur spécifique. L'ensemble des besoins énergétiques de tous les pavillons d'un même site ont donc été traités comme faisant partie d'un seul « bâtiment » pouvant être décrit par des caractéristiques s'appliquant à l'ensemble.

L'analyse du rôle des accumulateurs sur la facturation énergétique est hautement sensible au nombre de compteurs et à la tarification applicable à chacun de ceux-ci. Le rôle du nombre et type de compteurs dans les décisions prises lors de la conception de la solution sont abordés dans les synthèses d'entrevues. Toutefois, le calcul des factures énergétiques des scénarios de substitutions est effectué en posant l'hypothèse qu'un compteur unique est associé à chaque site, avec la tarification applicable selon l'ampleur de la charge desservie. Auquel cas, le résultat émanant de l'analyse pourrait diverger significativement de la facturation réelle du site avec ces multiples compteurs et tarifs.

1.4 Méthodologie globale et structure du rapport

Pour atteindre les objectifs visés, le projet fut divisé en quatre phases :

1. Inventaire du stockage thermique existant dans les bâtiments scolaires québécois
2. Entrevues avec les personnes clés
3. Étude détaillée de la performance des accumulateurs sur certains sites choisis
4. Comparaison de la performance avec des technologies connues via des scénarios de substitution

La première phase a non seulement permis de répertorier le stockage thermique existant dans les centres de services scolaires (CSS), mais également d'identifier les personnes clés impliquées en vue de la seconde phase. Une série d'entrevues (phase 2) a permis de documenter l'expérience passée de trois catégories d'intervenants distincts : les gestionnaires de projets des CSS concernant l'approvisionnement, les gestionnaires de bâtiments concernant l'opération et l'entretien des accumulateurs thermiques électriques, et les professionnels des firmes de génie-conseil et des entreprises de services écoénergétiques (ESE) concernant la conception de la solution impliquant cette technologie.

La phase d'étude détaillée (phase 3) a permis d'exploiter les données d'opérations d'un sous-groupe de bâtiments pour produire des données probantes sur l'opération, la rentabilité et impact énergétique des accumulateurs. Une modélisation du comportement des accumulateurs thermiques, calibrée sur ces données d'opération, a permis de simuler des scénarios alternatifs où l'accumulateur était remplacé par une autre technologie connue afin de pouvoir contraster la performance relative des accumulateurs tant au niveau de la réduction ou du déplacement de la pointe de puissance appelée, ainsi que de la réduction de la facturation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre.

Le présent rapport a pour rôle de présenter résultats finaux de l'étude et de tirer les constats qui s'imposent. Pour ce faire, les résultats de l'inventaire seront présentés au Chapitre 2 incluant les caractéristiques générales des bâtiments recensés et les technologies de stockage thermique qui s'y trouvent. Ce chapitre permettra de souligner la dominance des accumulateurs thermiques électriques parmi les technologies répertoriées, soit la technologie sur laquelle s'est concentrée l'étude détaillée.

Au Chapitre 3, les résultats des entrevues effectuées avec les gestionnaires immobiliers, des opérateurs de bâtiments institutionnels et des concepteurs de systèmes CVCA seront présentés. Les premiers permettent de présenter le contexte dans lequel ces projets ont été effectués, les circonstances qui ont mené à l'adoption de la technologie, et de documenter la perception des gestionnaires vis-à-vis du processus d'acquisition des accumulateurs. Les entrevues avec les opérateurs permettent de faire ressortir leur expérience d'entretien, de maintenance et d'opération de ces appareils. Finalement, les entrevues avec les concepteurs permettent de souligner les complexités liées à l'inclusion d'appareils de stockage thermique dans un réseau et d'identifier les lacunes du processus de conception et de mise en service des appareils. Une synthèse des enjeux répertoriés a permis d'identifier diverses **Bonnes Pratiques**. Celles-ci visent tantôt les gestionnaires du parc immobilier institutionnels, les opérateurs de bâtiment ou les concepteurs de réseau de chauffage et touchent à l'ensemble des pratiques désirables lors de l'acquisition, l'installation ou l'opération d'accumulateurs thermiques électriques dans un bâtiment institutionnel.

Le Chapitre 4 est une introduction des sites retenus pour l'étude détaillée. Les sites investigués y sont décrits brièvement, la configuration de leur réseau CVCA est présentée, les stratégies de contrôle répertoriées et le succès de celles-ci à déplacer la pointe électrique des bâtiments sont discutés.

Au Chapitre 5, la performance des ATC des différents sites étudiés est présentée. La méthode employée pour déterminer les différents flux thermiques pertinents (puissance thermique fournie, pertes thermiques et puissance électrique appelée). Ces profils de puissance, calculés à partir des données d'opération, sont présentés et utilisés pour générer des scénarios de substitution afin de faire ressortir l'apport des accumulateurs pour une saison hivernale². Ceux-ci permettent de présenter les avantages et inconvénients des accumulateurs vis-à-vis un scénario de substitution où d'autres technologies connues auraient été installées en lieu des ATC.

La conclusion du rapport revient sur les **Bonnes Pratiques** à implémenter immédiatement par les gestionnaires, opérateurs et concepteurs lors de futurs projets. L'analyse des constats issus de l'ensemble des phases du projet de recherche permet également d'identifier des **Recommandations**. Au contraire des **Bonnes Pratiques**, celles-ci se situent hors de la sphère de contrôle des intervenants précédents. Elles devront plutôt être adressées à moyen terme par des parties prenantes différentes (manufacturiers, fournisseurs, entreprise de service public, organisations gouvernementales, etc.) pour favoriser le succès d'implantations futures.

² La définition retenue pour la saison hivernale est celle d'Hydro-Québec et d'échelonne donc du 1^{er} décembre au 31 mars de l'année suivante.

Chapitre 2 – Inventaire des sites

D'emblée il était convenu de limiter le sujet d'étude aux bâtiments des centres de services scolaires (CSS) dû à la large présence de combustibles fossiles dans leur système de chauffage, à la similarité des usages des bâtiments favorisant la comparaison, et à la prédictibilité de leur occupation. De plus, il était connu que certains CSS avaient implémenté des technologies de stockage thermique dans le passé, notamment des accumulateurs thermiques, des réservoirs de matériaux à changement de phase et des puits à colonnes permanentes. Nonobstant le choix des édifices scolaires comme sujets pour cette étude, l'objectif demeure d'obtenir des résultats qui seront applicables à d'autres types de bâtiments institutionnels.

Le recrutement des sites pour participation au projet de recherche a été fait via un appel à participation envoyé par le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur. Celui-ci fut transmis aux directrices et directeurs des ressources matérielles des CSS le 24 septembre 2019, appuyé par une lettre du directeur général des infrastructures du Ministère (en Annexe). Cet appel sollicitait la participation de bâtiments qui se trouvaient dans au moins une des quatre (4) catégories d'intérêt pour l'étude, soit :

- A. Un bâtiment dans lequel une technologie de stockage thermique a déjà été installée et est présentement fonctionnelle ;
- B. Un bâtiment pour lequel la possibilité d'installer une technologie de stockage thermique a été étudiée et il a été décidé de ne pas aller de l'avant avec l'installation ;
- C. Un bâtiment dans lequel une technologie de stockage thermique sera installée au courant de l'année à venir (2019-2020) ;
- D. Un bâtiment dans lequel une technologie de stockage thermique a été installée puis a été démantelée ou mise hors service pour diverses raisons.

Les technologies de stockage thermique visées incluaient : les accumulateurs thermiques électriques, les réservoirs de matériaux à changement de phase, les réservoirs de liquide (eau, huile, eau salée, etc.), les stockages souterrains (roches, aquifères, cavernes, puits géothermiques, etc.) et les technologies de stockage chimique.

2.1 Sites répertoriés

L'appel à participation fut bien reçu par les centres de services scolaires (CSS), et dix d'entre eux ont répondu à l'appel, soient :

1. CSS du Fer ;
2. CSS du Lac-Saint-Jean ;
3. CSS des Affluents ;
4. CSS Sir-Wilfrid-Laurier ;
5. CSS Pays-des-Bleuets ;
6. CSS des Trois-Lacs ;
7. CSS des Phares ;
8. CSS des Samares ;
9. CSS de la Seigneurie-des-Mille-Îles ;
10. CSS de la Côte-du-Sud.

Au sein de ces 10 CSS, un total de 156 bâtiments a été répertorié comme faisant partie de l'une ou l'autre des quatre catégories. La Figure 3 illustre leur répartition géographique.



Figure 3: Nombre de bâtiments répertoriés suite à l'appel à participer

Chaque carreau indique un CSS ayant répondu à l'appel à participer et le nombre de bâtiments répertoriés qui y est associé. L'ensemble des CSS couvrent un total de huit (8) régions administratives, répartis de la manière suivante :

- Le CSS du Fer est situé dans la région de la Côte-Nord et est composé de quatre (4) bâtiments répertoriés.
- Les CSS du Lac-Saint-Jean et celui du Pays-des-Bleuets se trouvent dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et comprennent 12 bâtiments et 1 bâtiment, respectivement.
- Le CSS des Phares est dans la région du Bas-Saint-Laurent et comporte 9 bâtiments
- Le CSS de la Côte-du-Sud est dans la région des Chaudière-Appalaches et comprend 2 bâtiments.
- Le CSS des Trois Lacs couvre la région de la Montérégie et comprend 14 bâtiments.
- Le CSS de Sir-Wilfrid-Laurier couvre les établissements anglophones des régions des Laurentides, de la Lanaudière, et de Laval (couvrant le territoire des CSS des Samares, de la Seigneurie-des-Mille-Îles et des Affluents) ; il comprend un total de 10 bâtiments répertoriés.
- Les CSS des Samares, de la Seigneurie-des-Mille-Îles et des Affluents sont dans la région de la Lanaudière et des Laurentides et comportent 85 bâtiments, 17 bâtiments et 2 bâtiments, respectivement.

2.2 Technologies de stockage thermique recensées

Les technologies de stockage thermique recensées dans ces bâtiments peuvent être regroupées dans les catégories suivantes :

- Accumulateurs thermiques, incluant :
 - Type centralisé, hydronique
 - Type centralisé, à air forcé
 - Type local, à air forcé
- Géothermie
- Réservoirs d'eau (parfois appelés « réservoirs solaires »)
- Réservoirs de matériaux à changement de phase
- Stratégies de contrôles exploitant la masse thermique des bâtiments

Le Tableau 1 présente les informations par rapport aux technologies installées dans les bâtiments répertoriés. Parmi les technologies présentement en opération (catégorie A), les plus répandues sont les stratégies de contrôle exploitant l'inertie thermique du bâtiment (39,2%), suivi de près par les accumulateurs thermiques (38,1%) et la géothermie (21,0%). On dénote qu'en septembre 2019, moment de la collecte des données de l'inventaire, un

nombre significatif de sites prévoyaient procéder à l'installation d'un accumulateur thermique électrique au cours de l'année suivante (18 sites, catégorie C).

Tableau 1: Répartition des bâtiments répertoriés selon les technologies et la catégorie de chaque site

Technologies	Nombre de bâtiment			
	A	B	C	D
Accumulateurs thermiques	67	2	18	4
Type centralisé, hydronique	51	0	9	4
Type centralisé, à air forcé	1	0	0	0
Type local, à air forcé	15	1	7	0
Géothermie	37	0	5	1
Réservoir d'eau	2	0	0	1
Matériaux à changement de phase	0	0	0	3
Stratégies de contrôle	69	0	6	0
Toutes technologies confondues	175	2	21	9

Le nombre de technologies recensées est supérieur au nombre de bâtiments répertoriés (207 versus 156) parce que certains bâtiments combinent plus d'une technologie, où figurent dans plus d'une catégorie (notamment A et D). Du nombre total de bâtiments répertoriés, 33,9 % comptent deux technologies en leur sein et 9,1% combinent trois technologies. Les combinaisons les plus fréquentes sont la géothermie et les stratégies de contrôle (18 bâtiments), les accumulateurs thermiques centraux (ATC) à eau et les stratégies de contrôle (17 bâtiments), la géothermie et les accumulateurs thermiques centraux à eau (14 bâtiments), ainsi que les accumulateurs locaux et les stratégies de contrôle (12 bâtiments).

Les différentes technologies de stockage thermique recensées sont présentées dans les sections suivantes.

Accumulateurs thermiques

Les accumulateurs thermiques utilisent de l'électricité pour chauffer des briques réfractaires et stocker de la chaleur sensible, d'où l'appellation *Electric Thermal Storage* en anglais. Quand l'appel de puissance du bâtiment sur le réseau électrique est faible, l'accumulateur consomme de l'électricité pour chauffer ses briques jusqu'à une haute température (maximum de 900°C) et ainsi stocker la chaleur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour desservir les besoins thermiques du bâtiment pendant les périodes de haute demande, sans augmenter l'appel de puissance sur le réseau électrique. Il existe principalement trois types d'accumulateurs thermiques accessibles au Québec :

- Accumulateurs thermiques centraux à air forcé
- Accumulateurs thermiques centraux hydroniques (c.-à-d. à eau)
- Accumulateurs thermiques locaux à air forcé.

Les modèles centralisés ont longtemps été connus sous le terme « ThermElect » au Québec. Ceux-ci ont été mis au point par Hydro-Québec, en partenariat avec le fabricant Steffes Corporation, du Dakota du Nord. L'appellation ThermElect s'appliquait alors tant au modèle hydronique (Série 9100) qu'au modèle à air forcé (Série 8100), chacun disponible dans deux capacités, soit 53 kW et 80 kW. Depuis, Steffes Corporation a créé de nouvelles versions, inspiré des designs d'origine et offre maintenant également des unités centralisées d'une capacité de 17.5 à 26.4 kW (Séries 5100, 6100 et 7100). Ces unités ont la possibilité d'opérer de façon autonome, toutefois la pratique plus courante est d'asservir leur commande au système de gestion du bâtiment (BMS) de façon à contrôler le moment et l'ampleur de leur recharge et gérer la pointe de puissance appelée du bâtiment. Les unités offrent la possibilité d'être opérés via une connexion BACnet, permettant une intégration simplifiée au BMS et l'accès à une série de données d'opérations (p. ex. le niveau d'énergie ciblé du noyau, le niveau d'activation du ventilateur, la température moyenne de chaque noyau, le nombre d'éléments actifs dans chaque noyau, etc.) comme **extrants** de l'appareil.

Une vue schématique d'une unité centralisée de type hydronique est illustrée à la Figure 4. Celle-ci comprend entre 2 et 3 groupes de briques réfractaires (1), intersectés de résistances électriques (2). Un ventilateur fonctionnant à vitesse variable (3) permet de faire circuler l'air contenu dans l'unité dans un canal (8) puis contre les briques pour

en extraire la chaleur. Cet air chauffé est ensuite poussé vers un échangeur air-eau (4) afin de transmettre la chaleur extraite des briques à l'eau du système de chauffage du bâtiment (5 à 6), comme le ferait une chaudière.

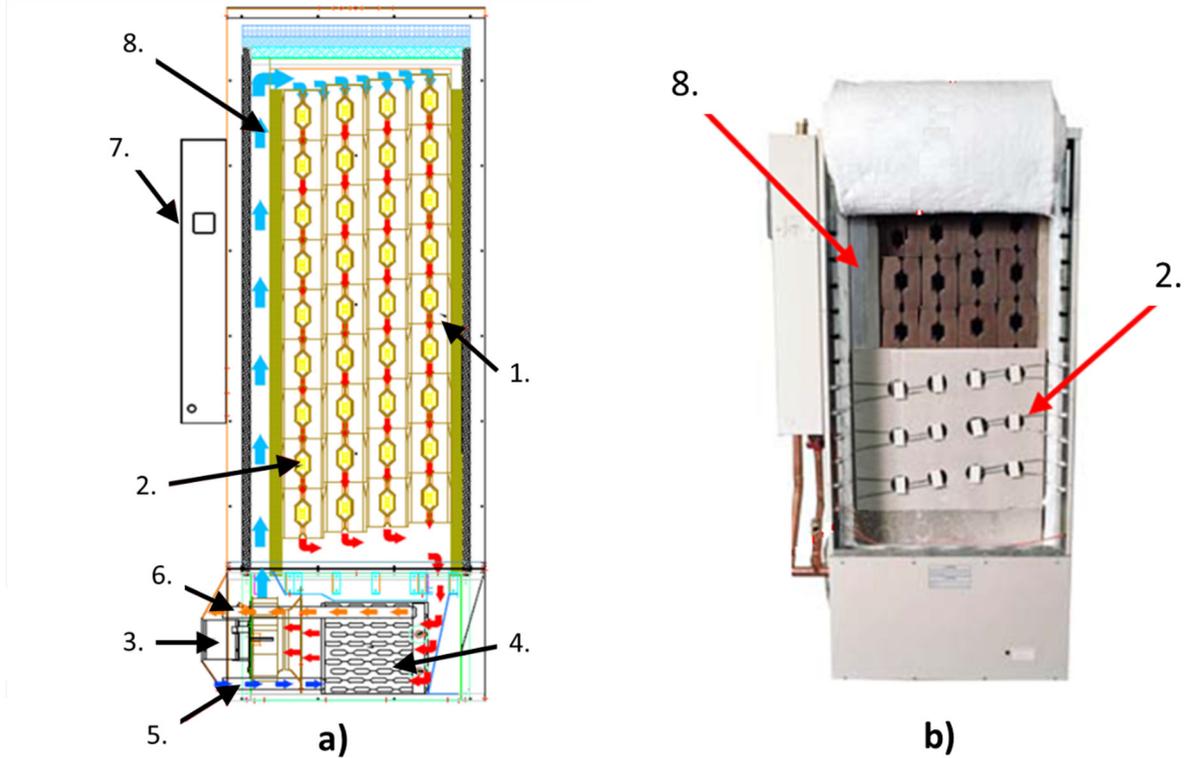


Figure 4: Composants d'un accumulateur thermique central (type hydronique)
a) Adapté de (Steffes, 2020), b) Adapté de (Steffes, 2016)

Comme illustré à la Figure 5, les unités à air forcé comportent deux modules adjacents. Le premier contient les briques réfractaires (1) et les éléments chauffants (2). Le second module est une section de gaine équipée du ventilateur d'extraction de la chaleur (3) et d'un second ventilateur (9) permettant à l'air chaud de se mélanger à l'air neuf provenant de l'extérieur. L'unité à air forcé est donc uniquement utilisée pour le préchauffage et/ou chauffage de l'air neuf.

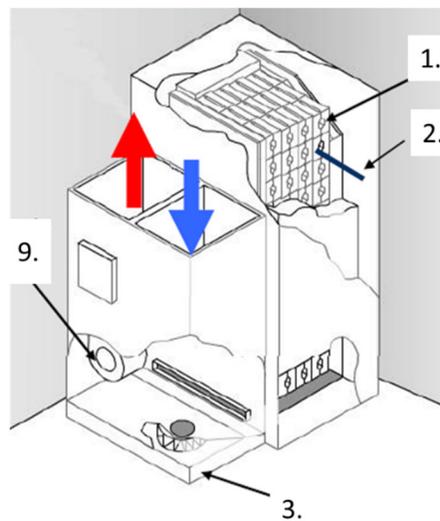


Figure 5: Composants d'un accumulateur thermique central (type à air forcé)
Adapté de (M. & L., 2007)

Pour une capacité similaire, cette unité est plus volumineuse que l'unité hydronique et requiert d'être localisée à proximité des gaines d'alimentation d'air extérieur afin de s'y connecter ; deux facteurs qui complexifient son installation dans une chaufferie existante. De plus, la dominance du chauffage hydronique dans le parc immobilier scolaire et la faible proportion de bâtiments ventilés expliquent sa faible popularité en comparaison de l'unité hydronique (1 unité à air forcé répertoriée versus 51 unités hydroniques).

Les accumulateurs thermiques locaux (ATL) sont de plus petite capacité et visent à remplacer les plinthes électriques chauffantes souvent installées au périmètre des bâtiments. Comme illustré à la Figure 6, ces unités sont équipées d'un système de contournement permettant de faire varier le débit d'air circulant contre les briques réfractaires et de contrôler la quantité de chaleur envoyée au local. Couvrant une gamme de puissance s'étendant habituellement de 500 W à 12 kW, les unités décentralisées répertoriées furent le plus souvent utilisées pour maintenir une température adéquate dans les portiques et halls d'entrée fortement achalandés des bâtiments institutionnels. Quoique celles-ci puissent opérer de façon autonome, une pratique récente est de déléguer leur commande au système de gestion central du bâtiment (Building Management System ou BMS en anglais) de façon à maintenir un contrôle sur le moment de leur recharge et gérer la pointe de puissance appelée du bâtiment.

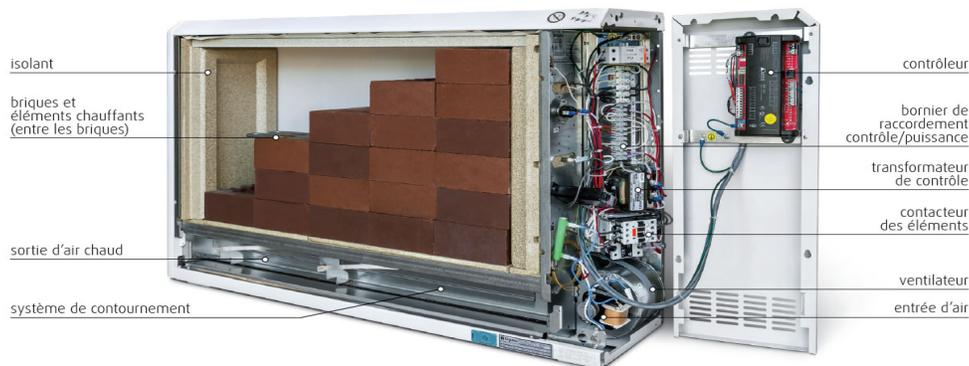


Figure 6: Composants d'un accumulateur thermique local (ATL).

Plusieurs marques différentes ont été accessibles au Québec dans les vingt dernières années dont notamment Dimplex, Steffes et Regulvar. Bien que Dimplex et Regulvar se soient depuis retirés du marché, certains de leurs produits demeurent dans différents sites de l'inventaire. La plus large part des produits répertoriés demeurent ceux de Steffes Corporation qui a eu le monopole du marché suite au retrait des autres joueurs. Récemment, les appareils de ELNUR GABARRON de Madrid en Espagne, connus sous l'appellation « *Ecombi smart storage heaters* », sont devenus disponibles sur le marché via le fournisseur Coldbrook Electric Supply. Des produits de type résidentiel (Classics et Honeywell de 450 à 1500 W) sont également disponibles en quincaillerie, mais ne permettent pas une intégration adéquate à un système de gestion du bâtiment (BMS).

Géothermie

Le terme « géothermie » réfère à un système qui utilise le sol ou les ressources du sol (dont l'eau souterraine) comme source de chaleur. Le plus souvent, la géothermie réfère au principe d'extraire de la chaleur du sol par l'intermédiaire de puits qui y sont creusés et d'un fluide caloporteur circulant dans la tuyauterie enfouie dans ces puits.

Parfois, la géothermie permet de faire du stockage thermique et donc de stocker de la chaleur pour un usage ultérieur. Lorsque c'est le cas, celle-ci est généralement utilisée pour du stockage intersaisonnier à basse température, en stockant de la chaleur récupérée du bâtiment en été pour un usage en hiver. La température de stockage sera inférieure à 90°C et la densité énergétique entre 5 kWh/m³ et 20 kWh/m³. Cette pratique nécessite certaines conditions géologiques spécifiques pour une telle utilisation. Au Québec, vu la basse température du sol, des pompes à chaleur seront nécessaires pour rehausser la température à la sortie des puits.

Il existe principalement trois types de stockage thermique utilisant de la géothermie :

- La géothermie à système ouvert ou stockage en aquifères
- La géothermie à système fermé ou stockage dans les puits géothermiques (*Borehole Thermal Energy Storage*, en anglais)

- La géothermie à puits à colonne permanente

Pour les 50 cas de géothermie qui ont été recensés, seulement 1 cas concerne une technologie de puits à colonne permanente (école Marie-Charlotte, CSS des Samares) et 1 cas concerne de la géothermie à système ouvert (école Notre-Dame-de-la-Paix, CSS des Samares). Dans le premier cas, le système n'est pas encore en fonction et sera installé sous peu dans le cadre d'un projet de recherche avec un professeur de Polytechnique Montréal. Dans le second cas, le système est dans la catégorie D et a donc déjà été démantelé. Les autres bâtiments ont tous des systèmes fermés et les discussions avec les opérateurs des sites concernés n'ont pas permis de confirmer si ceux-ci sont utilisés comme des systèmes de géothermie traditionnels ou s'ils sont effectivement utilisés pour faire du stockage thermique permettant de déplacer ou écrêter une pointe d'appel de puissance sur le réseau électrique.

Réservoirs d'eau

L'utilisation des réservoirs d'eau pour le stockage thermique est une technologie très mature et utilisée depuis plusieurs années. L'eau chaude est stockée dans un réservoir pour ensuite être réutilisée dans un réseau d'eau chaude domestique, dans un réseau de chauffage hydronique ou même dans un réseau urbain. Lorsque des panneaux solaires thermiques sont utilisés comme source de chaleur pour un bâtiment, un réservoir d'eau (ou réservoir solaire) est généralement prévu. Ce type de stockage n'est pas coûteux et requiert un faible niveau d'entretien. Les réservoirs d'eau chaude sont généralement utilisés à des températures inférieures à 100°C et leur densité de stockage est de l'ordre de 35 kWh/m³.

Pour cette technologie, un total de 5 sites ont été répertoriés dont 4 dans la catégorie A et 1 dans la catégorie D. Dans ce dernier cas, la raison de la mise hors fonction de l'unité de stockage est liée au bris du panneau solaire qui y était associé. Ainsi, il ne fut pas jugé d'un particulier intérêt d'étudier l'un de ces 5 sites dans la phase d'étude détaillée.

Matériaux à changement de phase

Le stockage par matériaux à changement de phase exploite la chaleur latente de fusion d'un matériau passant de l'état solide à l'état liquide. C'est une technologie attrayante de par sa grande capacité de stockage et sa capacité à livrer de la chaleur à une température constante. Les matériaux les plus courants utilisés pour le chauffage des bâtiments sont les paraffines ; elles ont une température de changement de phase de 20 à 60°C et une densité de stockage de 140 à 280 kJ/kg.

Au total, 3 bâtiments ont été répertoriés avec cette technologie, tous situés dans le CSS des Samares. En date d'aujourd'hui, la technologie a été installée puis a été démantelée (catégorie D) dans les 3 sites pour des raisons de non-performance ce qui rend ces technologies de faible intérêt pour l'étude détaillée.

Stratégies de contrôle

Le stockage thermique utilisant la masse thermique du bâtiment est une mesure d'efficacité énergétique qui est économiquement viable pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Le principe est d'utiliser l'inertie thermique des matériaux composant l'enveloppe du bâtiment pour stocker la chaleur provenant du soleil, ou d'autres sources, pour ensuite la restituer à l'air des locaux lorsque la température extérieure est en baisse. Il existe principalement deux techniques exploitant la masse thermique des bâtiments :

- Stratégies de stockage passives, et
- Stratégies de stockage actives.

La première catégorie couvre un ensemble de mesures permettant de bénéficier au maximum du rayonnement solaire pour pallier aux besoins thermiques d'un bâtiment. Celles-ci incluent des notions de forme, d'orientation du bâtiment, de répartition des ouvertures, mais aussi une forte isolation thermique et une enveloppe à forte inertie thermique. Ces mesures nécessitent une intégration dans la conception du bâtiment et de son enveloppe et sont donc rarement utilisées dans le cadre de rénovation de bâtiments existants les rendant peu pertinentes à la présente étude.

La seconde catégorie nécessite un contrôle actif de systèmes électromécaniques permettant de choisir le moment où le stockage est chargé et/ou déchargé vers le bâtiment. Ces stratégies peuvent inclure l'exploitation de planchers

radiants à haute masse thermique ou encore des stratégies de préchauffage de l'air des locaux. Dans le cas présent, l'ensemble des cas représentent une stratégie de préchauffage de l'air des locaux et tous les sites identifiés (44) sont situés dans la CS des Samares. L'usage de telles stratégies de préchauffage n'affecte en rien la source thermique exploitée et ne requiert aucun appareil additionnel, outre l'usage d'un système centralisé de gestion du bâtiment (BMS). Toutefois, ces stratégies ne permettent habituellement de déplacer les pointes associées au chauffage que sur de courtes périodes (max. 2 heures). Sachant que les périodes de pointes du réseau sont habituellement d'une durée de 3 à 4 heures, cela rend cette approche de faible intérêt pour l'étude détaillée.

Technologie retenue

La technologie des accumulateurs thermiques est la plus répandue, offre multiples options de capacités et d'applications (réseau de chauffage, d'air neuf, combinaison possible avec la géothermie et le solaire thermique). L'étude détaillée se concentre donc sur celle-ci. Gardant en tête le contexte de retrait du mazout des bâtiments institutionnels et celui, plus large, de l'Exemplarité de l'État relativement à l'usage de l'énergie renouvelable, l'étude détaillée porte sur les unités centrales. Celles-ci visent en effet les mêmes applications qu'une chaudière aux combustibles ou une fournaise biénergie, permettant plus directement d'éliminer le recours aux combustibles fossiles pour le chauffage de l'air et de l'eau dans les bâtiments. Les unités hydroniques centralisées pouvant être utilisées pour alimenter tant une boucle d'eau de chauffage adressant les besoins périphériques du bâtiment que des serpentins à l'eau chaude utilisés pour le chauffage et/ou préchauffage de l'air neuf, elles sont facilement intégrables à la plupart des réseaux de chauffage existants. Celles-ci seront donc le point de mire de l'étude détaillée.

2.3 Bâtiments retenus

Un des objectifs de ce projet est d'identifier, si possible, les caractéristiques générales des bâtiments pour lesquels les technologies de stockage seraient d'intérêt. Il convient donc d'analyser l'ensemble des sites où de telles technologies furent installées de façon à voir si de grandes tendances en émergent³. Il faut également s'assurer que les bâtiments retenus pour la phase d'étude détaillée sont à la fois représentatifs des situations de succès et d'insuccès de ces technologies afin de tracer un portrait réaliste et de délimiter adéquatement les deux situations. De plus, un équilibre doit être atteint entre choisir des bâtiments diversifiés pour délimiter le territoire d'application du stockage, versus sélectionner assez de bâtiments similaires pour produire des conclusions qui soient réellement généralisables à l'ensemble de la catégorie.

Bien que les bâtiments gérés par les centres de services scolaires représentent la part dominante du secteur institutionnel, le présent projet souhaite dresser des conclusions applicables aux autres parcs immobiliers du secteur, soient : les bâtiments du secteur de la santé et des services sociaux, les ministères et organismes gouvernementaux, les universités, les cégeps, et le parc de la Société québécoise des infrastructures. Conséquemment, les bâtiments retenus doivent être représentatifs du parc immobilier scolaire, mais aussi, de par leurs caractéristiques générales et usages, permettre une comparaison avec divers bâtiments des autres secteurs du domaine institutionnel.

À partir de ces constats, un total de 18 bâtiments ont été retenus pour l'analyse détaillée dont les caractéristiques générales sont présentées dans le Tableau 2. Une fiche synthèse comportant les caractéristiques générales du site, l'analyse de l'appel de puissance du bâtiment, la description de la configuration de son réseau de chauffage, et la stratégie de contrôle utilisée pour opérer les accumulateurs s'y trouvant, est présentée dans les fiches synthèses en annexe. Les sections suivantes serviront à présenter les caractéristiques générales des sites retenus et à les comparer à celles de l'inventaire dans son ensemble afin de s'assurer de représenter le plus fidèlement possible la variété des expériences vécues.

³ Des 156 bâtiments initialement répertoriés dans les catégories A et D, les informations nécessaires n'ont pu être recueillies que pour 121 sites.

Tableau 2: Bâtiments retenus pour l'étude détaillée

ID.	Région	Vocation	Année de construction	Superficie m ²	Ventilation ¹	Usage ²	Année d'inst. ATC ³	Scénario de subst. ⁴
1	Montérégie	Primaire	1952	1 438	Non	Rad	2017	✓
2	Montérégie	Primaire	1955	901	Non	Rad	2016	✓
3	Montérégie	Primaire	1951	4 201	Non	Rad	2016	×
4	Montérégie	Primaire	1971	4 402	Oui	OA+Rad	2016	✓
5	Montérégie	Primaire	1971	3 904	Oui	OA+Rad	2015	✓
6	Montérégie	Primaire	1956	3 600	Oui	OA+Rad	2017	×
7	Montérégie	Primaire	1956	1 633	Oui	Rad	2019	×
8	Laurentides	Secondaire	1964	24 074	Oui	ECD	2010	×
9	Laurentides	Secondaire	1951	7 742	Non	Rad	2008	✓
10	Chaudière-Appalaches	Secondaire	1961	34 262	Oui	OA+Rad	2015	✓
11	Chaudière-Appalaches	Secondaire	1947	18 628	Oui	OA+Rad	2015	✓
12	Bas-Saint-Laurent	Secondaire	1957	5 786	Non	Rad	2017	×
13	Bas-Saint-Laurent	Pré-scolaire et primaire	1988	4 413	Non	OA+Rad	2020	×
14	Bas-Saint-Laurent	Primaire	1957	3 303	Non	Rad	2016	×
15	Lanaudière	Primaire	1954	2 822	Oui	Rad	2008	×
16	Lanaudière	Primaire	1951	3 704	Oui	Rad	2008	✓
17	Saguenay-Lac-Saint-Jean	Primaire	1962	2 356	Non	Rad	2013	×
18	Saguenay-Lac-Saint-Jean	Primaire	1957	2 242	Oui	Rad	2013	✓

¹ La colonne spécifie si le type du bâtiment indique que « la majeure partie du bâtiment est ventilée par un système mécanique » ou non.

² L'usage spécifie les besoins thermiques desservis par l'accumulateur soit le chauffage des espaces par des appareils hydroniques localisés dans ceux-ci tels des radiateurs, « Rad », du chauffage ou préchauffage de l'air extérieur, « OA », ou le chauffage de l'eau domestique, « ECD ».

³ La colonne spécifie l'année d'installation de l'accumulateur. La plupart des installations ont eu lieu à l'été de l'année listée.

⁴ La colonne spécifie si les données permettent de générer les scénarios de substitution ou non.

Superficie des bâtiments

La Figure 7 illustre la répartition des superficies de plancher des 121 bâtiments répertoriés. Cette caractéristique est importante dans le choix des bâtiments retenus pour l'étude détaillée, car la taille des bâtiments est corrélée avec leur consommation énergétique et, dans une moindre proportion, leur appel de puissance. Ces considérations se reflètent dans différentes hypothèses formulées par certains professionnels du domaine sur les circonstances qui justifient l'adoption des accumulateurs thermiques.

La Figure 7 démontre une forte présence de bâtiments de petite et moyenne taille. On remarque :

- Les petits bâtiments, d'une superficie inférieure à 1 500 m², sont au nombre de 20 et représentent 16.5% de l'échantillon ;
- Les moyens bâtiments, d'une superficie comprise entre 1 500 m² et 10 000 m², sont au nombre de 91 soit 75% de l'échantillon ; et
- Les grands bâtiments, d'une superficie supérieure à 10 000 m², sont au nombre de 10 soit 8% de l'échantillon.

Les bâtiments de petite et de moyenne taille offrent donc un bon potentiel de candidats pour cette étude et totalisent 13 des bâtiments retenus. Comme la superficie moyenne d'une école est de 3 138 m² (S. Tremblay-Lemieux, 2019), ces sites maximisent le potentiel de conclusions généralisables au parc immobilier scolaire québécois et institutionnel de façon plus générale.

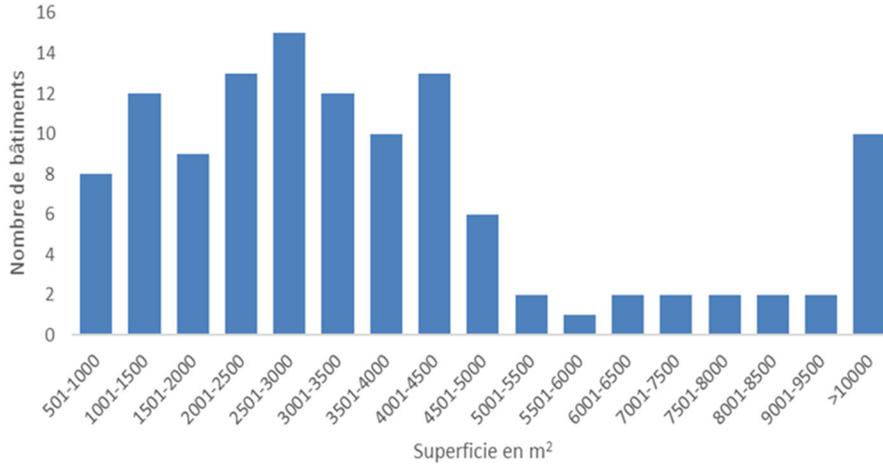


Figure 7: Superficie des bâtiments d'intérêt (n=121)

Les bâtiments scolaires de large superficie (>10 000 m²) sont les plus susceptibles de s'apparenter à un petit hôpital, un centre d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD) ou un large édifice à bureaux. Ils sont présents en faible nombre dans l'échantillon répertorié, mais 3 bâtiments ont néanmoins pu être identifiés pour l'étude détaillée.

Nature d'utilisation des bâtiments

La nature d'utilisation des bâtiments de l'échantillon est indiquée au Tableau 3. On remarque que les écoles primaires dominent l'échantillon. Les écoles secondaires sont plus susceptibles d'héberger des locaux dont l'usage pourrait amener des pointes de puissance de chauffage lié à une forte alimentation d'air extérieur (p. ex. ateliers de menuiserie) ou d'importants besoins en eau chaude domestique (p. ex. piscine, douches, cuisine de cafétéria). Ce sont donc les écoles secondaires qui sont les plus susceptibles d'avoir des usages énergétiques s'apparentant à ceux d'un petit hôpital ou d'un centre d'hébergement. Malgré leur faible représentation dans l'échantillon de bâtiments répertoriés, 5 écoles secondaires sont retenues pour la phase détaillée dont 3 sites de large superficie (>15 000 m²) afin de tracer des conclusions pertinentes à ces édifices.

Tableau 3: Nature d'utilisation des bâtiments de l'échantillon (n=121)

Nature du bâtiment	Nombre
École primaire	90
École secondaire	16
École préscolaire et primaire	6
École préscolaire, primaire et secondaire	1
Formation professionnelle	5
Atelier	1
Centre administratif	1
Centre Sportif	1
TOTAL	121

Année de construction

Tout comme la superficie, l'année de construction est une caractéristique importante dans le choix des bâtiments retenus pour l'étude de performance. La Figure 8 présente l'année de construction des différents bâtiments de l'échantillon (n=121). On y remarque une dominance de bâtiments construits entre 1950 et 1980. En raison des normes de construction instaurées à partir des années 1976, les bâtiments construits avant cette date ont plus de chance de souffrir d'une enveloppe de faible performance thermique et donc de subir des pointes de chauffage importantes. Ils sont également plus susceptibles d'être équipés de réseaux de chauffage hydronique et ventilés naturellement.



Figure 8: Répartition de l'année de construction des bâtiments d'intérêts (n=121).

La Figure 9 illustre l'année de construction de 2158 bâtiments du parc immobilier scolaire québécois dédiés à l'enseignement du cycle primaire. Tout comme la Figure 8, elle illustre qu'une large proportion des édifices ont été construits entre 1950 et 1969. En se concentrant sur des bâtiments construits dans ces deux décennies, les conclusions tirées seront applicables à une large portion du parc immobilier scolaire québécois.

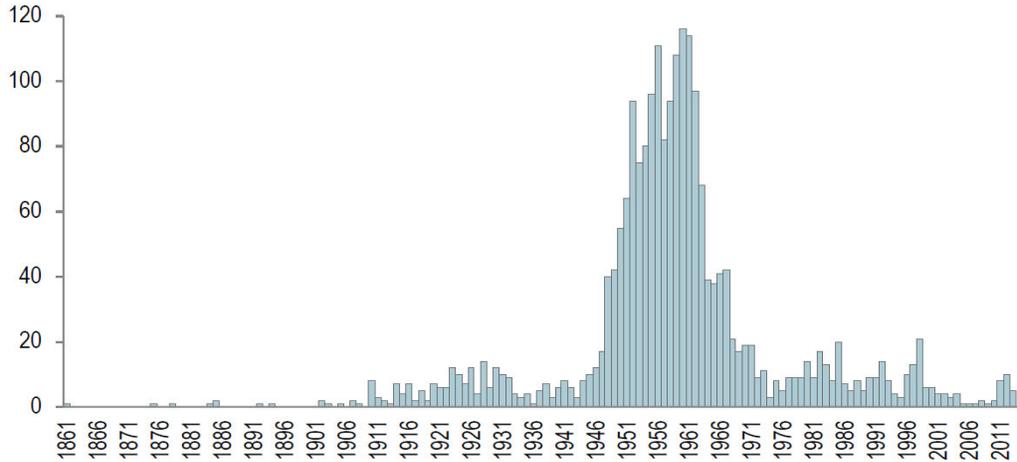


Figure 9: Répartition de l'année de construction de 2158 bâtiments scolaires québécois du cycle primaire.

Source d'énergie de chauffage

Dans le but de juger de la pertinence d'un système de stockage thermique lors d'une transition énergétique, il convient de regarder si l'installation du stockage dans les sites répertoriés a contribué à réduire leur consommation en énergies fossiles au profit des énergies renouvelables. La Figure 10 indique la répartition des sources d'énergie pour 100 des 121 bâtiments de l'inventaire, avant et après l'installation du stockage.

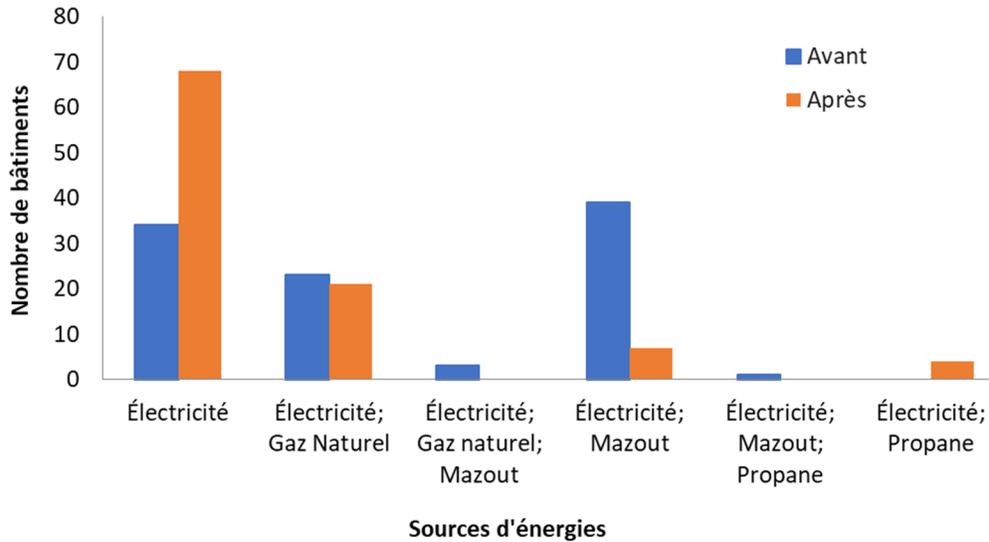


Figure 10: Répartition des sources d'énergie avant et après l'installation du stockage (n=100).

La Figure 10 montre que la proportion de bâtiments utilisant l'électricité comme source de chauffage a connu une augmentation considérable, passant de 34 % à 68 %, après la mise en place du stockage. Tous les bâtiments qui utilisaient trois (3) sources d'énergie sont passés à deux sources (02), en éliminant le mazout qui est la source la plus polluante utilisée dans les bâtiments institutionnels. Similairement, pour 12 des bâtiments retenus la rénovation au cours de laquelle l'accumulateur fut installé a permis une transition énergétique de leur système de chauffage vers une prédominance des énergies renouvelables.

Malgré que 32 bâtiments des 100 de l'inventaire consomment toujours de l'énergie fossile, conformément aux données relatives à la caractéristique « type de bâtiment », l'électricité est la principale source de chauffage pour 28 de ceux-ci (87,5%) après l'ajout du stockage. Il semblerait que le gaz naturel, le mazout et le propane sont toujours utilisés pour le chauffage d'appoint afin de limiter la pointe électrique. Afin de comprendre pourquoi l'utilisation des énergies fossiles est toujours d'actualité après l'installation de stockage thermique, 10 sites conservant un certain usage de combustibles furent retenus pour l'étude détaillée.

Type de bâtiment

Un code alphanumérique appelé « type de bâtiment » a été mis en place par le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MÉES, 2018). Il comporte trois caractères pour catégoriser les bâtiments selon :

- La source énergétique prédominante utilisée pour le chauffage,
- La forme prédominante de ventilation du bâtiment (ventilation naturelle, mécanique ou mécanique avec climatisation), et
- La présence d'espaces particuliers engendrant des besoins énergétiques significatifs comme les ateliers et les piscines.

La Figure 11 présente 121 bâtiments répertoriés selon leur « type ». Les informations relatives à chaque type ont été relevées dans le portail Hélios pour la période du 1er juin 2018 au 31 juillet 2019, soit pour la plupart après l'implantation du stockage.

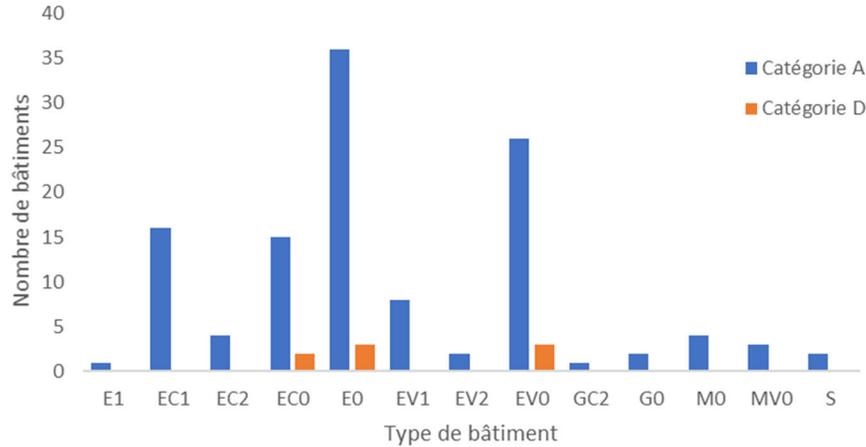


Figure 11: Répartition des sources d'énergie avant et après l'installation du stockage (n=100).

Similairement, aux conclusions reliées aux caractéristiques précédentes, on remarque une faible présence de bâtiments ayant des espaces engendrant des besoins énergétiques significatifs (codification incluant les chiffres 1 et 2). Un peu plus de la moitié (70) rapporte que la majeure partie du bâtiment est ventilée ou climatisée par un système mécanique (codification incluant les lettres « V » ou « C », respectivement). L'échantillon retenu permettra donc de contraster le rôle des accumulateurs dans des réseaux de chauffage hydronique (11 sites) à leur rôle pour le conditionnement de l'air extérieur (6 sites) et de l'eau chaude domestique (1 site).

Il est important de noter que bien que le tarif G soit le tarif le plus courant chez les clients de la clientèle « affaires » d'Hydro-Québec, il est moins courant dans l'échantillon des bâtiments de l'inventaire. En effet, 30 bâtiments seulement sont abonnés au tarif G dont plusieurs sont équipés d'un second compteur facturé au tarif M. Cela s'explique par le fait que les bâtiments facturés au tarif G rentabiliseraient plus difficilement un investissement dans une technologie de stockage puisque leur appel de puissance n'est pas facturé. Les deux scénarios seront représentés dans les 18 sites retenus pour la phase d'étude détaillée.

Chapitre 3 - Synthèse des entrevues

3.1 Gestion de projet et acquisition

La littérature relève plusieurs barrières historiquement rencontrées par les gestionnaires institutionnels dans l'implémentation de technologies novatrices permettant d'effectuer un virage écoénergétique des bâtiments sous leur responsabilité, dont notamment :

- a) le manque d'incitatifs financiers,
- b) le manque d'expertise des professionnels,
- c) le manque de connaissances techniques des gestionnaires et opérateurs,
- d) la réglementation en vigueur,
- e) l'incertitude face aux coûts initiaux et le manque de volonté d'assumer des coûts initiaux plus élevés en début de projet, ainsi que
- f) le manque d'information sur les bénéfices des nouvelles technologies.

Plusieurs de ces barrières pourraient, au moins en partie, être adressées à travers des ajustements au processus d'approvisionnement. En effet, le mode de réalisation contractuel, ses avantages et inconvénients, affectera le projet depuis l'acquisition jusqu'à l'opération de la technologie. Conséquemment, il est important de transmettre aux gestionnaires de projets des informations claires vis-à-vis des stratégies à mettre en place si celles-ci sont susceptibles d'influencer le succès d'un projet d'installation d'accumulateur.

Des entrevues ont été effectuées avec les gestionnaires de projets ayant mis en place des accumulateurs dans des bâtiments institutionnels dans le passé, dans le but de documenter comment le processus d'acquisition des appareils fut vécu, de dégager leur perception des avantages et inconvénients de la technologie et de connaître, du point de vue de l'approvisionnement, les conditions nécessaires pour optimiser la réussite de leur implémentation. Les questions concernant le volet de l'approvisionnement touchent chacune des phases des projets de rénovations. Les modes de réalisation utilisés par les intervenants par le passé ont été documentés ainsi que toute difficulté attribuable à l'implémentation d'accumulateurs dans ce mode de réalisation. L'objectif ici n'est pas de juger de la pertinence d'un mode vis-à-vis d'un autre, mais de relever si des difficultés particulières sont liées à certains modes dans le cas de l'installation d'accumulateurs. Plus particulièrement, des questions spécifiques tenteront d'investiguer les enjeux liés à la disponibilité d'expertise des professionnels et gens de métiers, ainsi qu'à la mise en service et à la commande des appareils, souvent considérée comme plus complexe que pour d'autres technologies.

Pour ce faire, les directeurs du service des ressources matérielles des 10 CSS répertoriés durant l'inventaire ont été contactés et ceux-ci ont identifié des intervenants potentiels au sein de leurs équipes. Une synthèse des enjeux émanant des entrevues est présentée ci-après avec la perception des gestionnaires de projets interviewés. Conformément aux directives du Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'ÉTS, les données recueillies sont confidentielles et seules des données anonymisées extraites des entrevues seront publiées dans ce rapport.

3.1.1 Entrevues des gestionnaires de projets

Sept (7) participants provenant de différents centres de services scolaires ont accepté de prendre part aux entrevues. Les caractéristiques des participants au volet « approvisionnement » sont indiquées au Tableau 4. Quatre (4) d'entre eux sont à l'emploi de CSS localisés dans la grande région métropolitaine de Montréal, un (1) est localisé dans la région de la Capitale-Nationale et deux (2) sont localisés hors de ces grands centres. Leur expérience avec la technologie est aussi assez variée. Le participant #1 est le plus expérimenté et a été impliqué dans 36 projets différents où des accumulateurs ont été installés. À l'autre extrême, le participant #3 n'a été impliqué que dans un seul projet. Ainsi, ils sont en mesure d'offrir une perspective sur une diversité d'expériences vécues.

Pour la vaste majorité des participants, leur première expérience avec des accumulateurs est survenue suite à la proposition de professionnels de considérer la technologie dans le cadre d'un projet initié à d'autres fins. À l'origine, le contexte ayant poussé les participants à entreprendre ces projets originaux était :

- la nécessité de remplacer des équipements désuets (chaudières ou chaufferie en générale),
- la réalisation d'une transformation majeure d'un bâtiment, ou
- la construction de nouveaux bâtiments.

Tableau 4: Caractéristiques des participants aux entrevues – volet approvisionnement

ID.	Expérience personnelle	Localisation des projets	Stratégie contractuelle	
			Expérience	Opinion
1	36 projets	Hors centre	Traditionnel	Favorable
			Contrat EEG	Favorable
2	2 projets	Région métropolitaine de Montréal	Traditionnel	Défavorable
			Contrat EEG	Favorable
3	1 projet	Hors centre	Traditionnel	Passablement favorable
4	3 projets	Région métropolitaine de Montréal	Traditionnel	Favorable
5	2 projets	Région de la Capitale	Traditionnel	Passablement favorable
6	2 projets	Région métropolitaine de Montréal	Traditionnel	Favorable
7	4 projets	Région métropolitaine de Montréal	Traditionnel	Favorable

Suite à cela, la volonté de diminuer l'empreinte environnementale du système de chauffage, de faire une meilleure gestion de la pointe électrique et de réduire les frais d'exploitation sont nommées comme principales justifications fournies par les professionnels pour choisir la technologie. Dans le cas du participant #5, la possibilité mentionnée par les professionnels de réduire la charge de travail des mécaniciens de machinerie fixe a aussi pesé dans la balance. Suite à quelques expériences favorables, certains participants (#1 et 4) ont d'emblée fait la demande que des accumulateurs soient ensuite inclus dans leurs projets subséquents.

Deux stratégies contractuelles ont été employées par les participants dans les projets où des accumulateurs ont été installés : le mode de réalisation *conception, soumissions et construction* avec adjudication au plus bas soumissionnaire (dis le mode traditionnel), et le *contrat d'économie d'énergie garantie* (dit contrat EEG) avec des entreprises de services écoénergétiques (ESE). Ce premier mode, dit *traditionnel*, est celui qui est le plus utilisé dans les contrats publics au Québec et il est établi qu'une de ses lacunes est la possibilité que des entrepreneurs peu qualifiés soient retenus lorsque le seul critère de sélection est le prix. Le second, nommé ci-après *contrat d'EEG*, est très similaire au mode *clés en main avec exploitation* à la différence près que l'entretien des équipements durant la période d'exploitation peut revenir à la charge du client, selon les modalités du contrat. Les ESE ont toutefois une obligation de résultat sous faute de pénalités contractuelles. En effet, un contrat EEG est « un accord entre un utilisateur final et une entreprise de services écoénergétiques qui garantit que les économies d'énergie découlant d'un projet d'amélioration de l'efficacité énergétique permettront de financer les frais d'immobilisation initiaux du projet, ainsi que les frais encourus tout au long du projet » (ACESE, 2018). La stratégie contractuelle utilisée dans les différents projets est rapportée au Tableau 4.

Seuls deux participants sur sept (#1 et 2) ont utilisé des *contrats d'économie d'énergie garantie* avec des entreprises de services écoénergétiques, tous les autres ayant exclusivement utilisé la stratégie dite *traditionnelle*. Tel que relaté par les participants #1, 2 et 3, le choix d'aller vers l'une ou l'autre des stratégies contractuelles évoquées est fortement lié au type de financement disponible : financement de maintien d'actifs ou l'autofinancement via un *contrat d'économie d'énergie garantie* (EEG). Fait important à souligner, un nombre important de participants ne semblaient pas connaître l'option des *contrats d'EEG* ou était sous l'impression que la réglementation en vigueur exigeait le recours à la méthode *traditionnelle*, avec adjudication au plus bas soumissionnaire.

Les participants n'ont pas associé les difficultés vécues durant les projets à la stratégie contractuelle utilisée. Un seul participant (#2) a jugé de façon défavorable, à forte proportion, l'usage de la méthode *traditionnelle* pour l'implémentation d'accumulateurs. Dans son cas, une installation passée effectuée avec des professionnels qui n'avaient pas d'expérience de la technologie a entraîné des conflits et délais lors de l'installation ; cette expérience l'a mené à favoriser les *contrats EEG* par la suite. En effet, la majorité des participants (4 sur 7) a relevé un plus grand risque avec le mode *traditionnel* que les professionnels et/ou les entrepreneurs retenus aient une faible connaissance des accumulateurs. Pour réduire ce risque, certains favorisent le recours à un comité de sélection basé sur la qualité la plus élevée pour le choix des professionnels (#3) afin que ceux-ci produisent un devis rigoureux.

Bonne pratique 1:

Sélectionner des professionnels en conception, commande-contrôle et des entrepreneurs qui ont une expérience avec les accumulateurs thermiques électriques.

Très peu de problématiques ont été vécus par les participants au niveau de l'installation des accumulateurs. Sur un total de 51 projets réalisés par les participants, seulement trois (3) ont rencontré des problèmes de ce genre. Les projets avaient alors été réalisés en mode *traditionnel*, et le manque d'expérience des professionnels (#2 et 5) et/ou de l'entrepreneur (#2) a été mis en cause par les participants. Ceux-ci ont affirmé de façon unanime qu'impliquer une équipe familière avec la technologie est un facteur clé de succès dans le cadre de projets incluant des accumulateurs. Le support du fournisseur, offrant un service de supervision durant les travaux et lors de la mise en service, fut aussi recommandé par la plupart (#1, 6, et 7).

Relativement à la complexité de commande-contrôle des accumulateurs, l'ensemble des participants souligne l'importance d'une bonne stratégie de contrôle comme facteur clé pour une implémentation réussie des accumulateurs. Toutefois, seulement trois participants sur sept disent avoir activement changé leur devis pour s'adapter à cette réalité. Or, de par les expériences rapportées, il apparaît clair que certaines spécifications additionnelles seraient à considérer dans la stratégie d'approvisionnement dans le futur. D'une part, l'intégration d'un serveur permettant l'accès à une prévision des conditions météorologiques anticipée le jour suivant, détaillé au Chapitre 4, est citée en exemple par plusieurs participants (#1, 3, 5 et 7) comme un item essentiel au contrôle adéquat des unités (Bonne pratique 3). Or, certains (#3 et 5) mentionnent que l'accès à ces prévisions météo n'avait pas été inclus dans la conception d'origine et qu'ils sont depuis en processus de le mettre en place sur tous leurs sites munis d'accumulateurs. D'autre part, deux participants (#2 et 3) ont relevé une occasion chacun où la complexité de commande-contrôle de l'appareil a posé problème ; dans un cas le manque d'expérience de la firme de commande-contrôle a été mise en cause (#3) alors que de l'autre (#2) c'est l'absence d'alertes au niveau du BMS lors de la défaillance de l'accumulateur qui est pointée du doigt⁴. Ces expériences réitèrent l'importance de faire appel à des professionnels en commande-contrôle ayant une bonne expérience de la technologie.

En ce qui a trait à la mise en service, les participants affirment ne pas avoir modifié leur processus d'approvisionnement par rapport à leurs pratiques habituelles. Ils s'entendent pour dire que la mise en service fut assez longue, s'étendant sur une saison de chauffage complète (#1, 6, et 7), voir une année entière (#4). Ils notent l'importance d'avoir l'assistance du fournisseur lors du démarrage (#6) et à quelques reprises durant la première année d'opération (#5 et 6). Trois (3) participants (#1, 2 et 6) jugent essentiel d'avoir de l'expérience à l'interne avec la technologie durant la 1re saison hivernale, et recommandent par ailleurs d'aller chercher l'aide de spécialistes externes si l'expertise n'est pas disponible à l'interne pour faire face à cette étape du projet. Bien que les raisons précises justifiant cette mise en service étendue ne furent pas spécifiées par les participants, les résultats des entrevues avec le personnel d'opération et d'entretien à venir à la Section 3.2 permettront d'éclaircir ce point. Il est important de préciser que deux (2) des participants (#1 et 2) ont effectué plusieurs de leurs projets dans un mode de *contrat EEG* dans le cadre desquels un suivi de performance de 3 à 5 ans est inclus au contrat, selon les sites. Ces clauses, typiques de *contrats EEG*, expliquent que ces participants n'aient pas rapporté avoir apporté des changements spécifiques aux clauses contractuelles relativement à la mise en service des accumulateurs.

Bonne pratique 2:

Exiger une mise en service améliorée durant la 1re année, impliquant tant le concepteur que le fournisseur, et ce aux frais du soumissionnaire.

Parmi les difficultés rapportées, on souligne la lourdeur de l'entretien et les réparations jugées dispendieuses par plusieurs participants (#1-3, 6 et 7). Le soutien par le fournisseur et la formation du personnel interne sont jugés essentiels à ce niveau. Les coûts d'entretien associés aux composants de l'appareil ainsi que l'expérience du personnel d'opération et d'entretien seront explorés en plus de détails à la Section 3.2.

⁴ Spécifiquement, cette situation est décrite lorsque l'accumulateur est la source unique de chauffage d'un réseau de chauffage périmétrique.

En somme, les participants reconnaissent de façon unanime que l'équipe impliquée doit posséder une expérience significative avec les accumulateurs pour assurer le succès de leur implémentation. Pour ce faire, le recours à une préqualification des professionnels sur la base de la qualité pourrait être favorisé pour les projets effectués en mode *traditionnel*. L'expertise relative à l'entretien et l'opération de l'unité doivent aussi être présentes à l'interne ou être supplémentées ponctuellement par des spécialistes de l'externe, particulièrement durant la première année d'opération. Parmi les clauses contractuelles pertinentes à inclure, une mise en service améliorée aux frais du soumissionnaire, s'étalant sur la 1^{re} année de garantie, est recommandée ainsi que le support du fabricant, autant durant l'installation que durant la première année d'opération. Finalement, il apparaît recommandable d'inclure l'intégration d'un serveur permettant l'accès à une prévision des conditions météorologiques dans les requis du projet.

3.2 Opération et maintenance

Ce volet porte spécifiquement sur les leçons apprises par les opérateurs du parc immobilier institutionnel liées à l'installation, l'opération et l'entretien d'accumulateurs thermiques électriques centraux (ATC). Les questions pertinentes à ce volet toucheront leur perception de l'expertise disponible sur le marché ainsi que leurs pratiques d'entretien des appareils. En se basant sur l'expérience vécue par les participants interrogés, le but est d'identifier l'entretien à anticiper afin de permettre aux opérateurs de mieux le planifier, tant au niveau budgétaire, qu'au niveau des ressources humaines, des pièces et de l'opération du réseau de chauffage. Les opérateurs pourront ainsi prendre les précautions nécessaires pour assurer une implémentation fructueuse.

Pour ce faire, des entrevues ont été effectuées avec les gestionnaires de bâtiments institutionnels ayant présentement ou ayant eu dans le passé la charge de l'opération et de la maintenance (O&M) d'accumulateurs. Les directeurs du service des ressources matérielles des 10 CSS répertoriés durant l'inventaire ont été contactés et ceux-ci ont identifié des intervenants potentiels au sein de leurs équipes. De plus, des professionnels œuvrant auprès d'autres organismes gouvernementaux où des ATC sont présentement en opération ont été recrutés pour participer aux entrevues, dans le but d'élargir les réalités rapportées au-delà de celle des CSS. Une synthèse des enjeux émanant des entrevues est présentée ci-après. Celle-ci se base principalement sur la perception des participants interviewés. Les données présentées ont été rapportées par les participants et certaines n'ont pu être validées par d'autres moyens (p. ex. : visites, factures, registres de maintenance, photos, rapports d'expertise). Conformément aux directives du Comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'ÉTS, les propos recueillis sont confidentiels et seule une version anonymisée est publiée dans ce rapport. Le Tableau 5 présente les participants aux entrevues O&M.

Tableau 5: Caractéristiques des participants aux entrevues - volet opération et maintenance

ID.	Employeur	Nb. bâtiments	Nb. ATC	Année d'installation du 1 ^{er} ATC	Nb. total de saisons de chauffage
1	CSS-Ressources matérielles	12	19	2011	99
2		1	2	2012	18
3		16	16	2008	85
4		6	6	2011	53
5		18	30	2006	339
6		2	5	2015	30
7		10	11	2012	52
8	ESE	6	12	2016	57
9		n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
10	Firme de génie-conseil	1	~ 2	n. d.	n. a.
11	SQI-Exploitation	4	~ 7	2018	~ 4
12		~ 2	> 15	2008	n. d.
13		1	9	2009	108

Sept (7) responsables du service des ressources matérielles de CSS et trois (3) personnes chargées de l'exploitation de bâtiments institutionnels du parc immobilier de la Société québécoise des infrastructures (SQI) ont été interrogés sur leur expérience vécue. Deux professionnels travaillant pour des ESE et un autre œuvrant au sein d'une firme de

génie-conseil sont également inclus dans cette synthèse d'entrevues puisqu'ils ont réalisé des mandats qui relevaient de l'opération et de la maintenance d'ATC. Bien que certains participants aient complété leurs réponses avec le soutien de collègues, l'ensemble des participants a été impliqué personnellement dans ce volet.

La majorité des participants ont vécu leur première expérience d'opération et de maintenance d'accumulateurs dans leur emploi actuel, hormis les deux participants travaillant pour la SQI (#11 et 12). De ces derniers, un avait déjà acquis une expérience avec un autre type de système de stockage thermique dans son emploi actuel et l'autre a vécu sa première expérience avec les ATC dans un emploi précédent. L'analyse qui suit se concentre principalement sur l'expérience d'opération et de maintenance vécue dans le cadre de leurs fonctions présentes.

Le nombre d'accumulateurs en opération dans les CSS pour lesquels des opérateurs ont été interrogés (#1 à 7) varie grandement, ce qui est un facteur d'influence sur leur expérience vécue. Le nombre total de saisons de chauffage correspond au nombre d'hivers d'opération de tous les accumulateurs. Ainsi, un accumulateur installé en 2008 a été opéré pendant 13 saisons de chauffage en date de l'entrevue. Les participants #1, 3 et 5 sont ceux dont les CSS comprennent le plus d'accumulateurs et dont le nombre de saisons de chauffage est le plus élevé. Le participant #2 s'occupe d'un seul site avec deux accumulateurs en opération depuis 9 ans, conséquemment son expérience est la plus limitée (nombre total de saisons de chauffage le plus faible) parmi les participants des CSS interrogés. Le nombre de saisons de chauffage pour le participant #6 est supérieur à celui du participant #2. Toutefois, les ATC dans les deux bâtiments du CSS #6 ont tous été installés dans le cadre d'un même projet, ce qui fait en sorte que ces CSS (#2 et #6) ont réalisé un seul projet d'installation d'ATC chacun. Les autres CSS ont pour leur part réalisé plusieurs projets, notamment les CSS pour lesquels travaillent le participant #3, #4 et #7 qui ont fait installer leurs premiers accumulateurs hydroniques en 2008, 2011 et 2012, respectivement, et qui ont procédé à plusieurs installations subséquentes au fil des ans. Le participant #4 a toutefois mentionné que le nombre d'ATC en opération dans le CSS auquel il se rapporte est demeuré constant depuis 2014, puisqu'il avait été difficile d'acquérir un accumulateur dans sa région. Il mentionne que ce n'est désormais plus un problème et qu'il y aura probablement d'autres installations d'accumulateurs à venir, bien qu'aucun projet n'était défini au moment de l'entrevue.

Le participant #1 est parmi ceux dont le CSS comprend le plus d'accumulateurs. Il a toutefois mentionné qu'il ne souhaitait plus faire d'installation d'ATC dans le futur, évoquant comme raison principale le manque d'expertise qualifiée en O&M, disponible sur le marché. Dans son cas, c'est le personnel à l'interne du CSS qui est appelé à intervenir sur les ATC et cette expertise interne repose sur deux personnes dont une partira à la retraite imminemment. Quant au participant #5, celui dont le CSS comprend le plus d'accumulateurs en opération (30) et un nombre de saisons de chauffage largement supérieur aux autres (339), il ne prévoit pas non plus installer de nouvelles unités. Dans son cas, les ATC ont été installés entre 2006 et 2015 dans une première phase de projets de rénovation énergétique visant à électrifier le chauffage des bâtiments du CSS. Les ATC, l'installation de BMS et le déploiement de stratégies de contrôle exploitant la masse thermique des bâtiments ont été les principaux outils qui ont permis de faire cette transition énergétique. En date de l'entrevue, ce participant avait entamé une seconde phase de projets dans laquelle les réseaux de chauffage à eau chaude sont progressivement retirés des bâtiments pour installer de l'aérothermie ; des projets dans lesquels l'installation de nouveaux ATC est moins propice. C'est principalement ce changement à la nature des projets de réfection qui l'amène à délaisser le recours au ATC pour utiliser une autre technologie comblant un besoin différent, plutôt qu'un enjeu spécifique d'O&M des ATC. Les réponses des autres participants indiquent qu'ils sont en faveur d'installer des ATC dans des projets futurs, dont trois (#2, 10 et 11) qui ont des installations prévues au cours de la prochaine année.

3.2.1 Opération des accumulateurs

L'accumulateur est perçu comme une technologie accessible par les opérateurs de bâtiments institutionnels. Trois des sept participants liés à des CSS (#1, 2 et 4) mentionnent que l'accumulateur est simple à comprendre et à opérer : il comporte peu de composants par rapport à une chaudière au mazout et son principe de fonctionnement avec les cycles de charge et de décharge est facile à comprendre. La simplicité de l'accumulateur a également été perçue durant les entrevues avec les autres participants, dont les réponses indiquaient qu'ils croyaient avoir une compréhension adéquate de l'équipement. Dans leur rôle de veiller à l'opération des équipements de chauffage, l'accumulateur peut être vu de façon analogue à une chaudière, en ce sens qu'il s'intègre dans un réseau de chauffage hydronique existant, sans en changer la température d'opération et qu'il permet de maintenir une température de sortie pendant un certain temps durant la décharge. Les opérateurs indiquent que leur expérience à opérer des

chaudières est pertinente pour les accumulateurs, qui ne sont pas si différents à leurs yeux. Certains des participants (#1 et 2) ont comparé favorablement l'opération des accumulateurs à celui des thermopompes et réseaux de géothermie pour lesquels le principe de fonctionnement est, au contraire, assez différent de celui d'une chaudière (cycle à compression de vapeur, dépendance de la performance vis-à-vis de la température extérieure, température d'opération plus basse) et demande, à leur avis, un suivi plus serré. Conséquemment, il apparaît que les participants interrogés jugent que l'ajout d'un accumulateur n'augmente pas la complexité d'opération de leur réseau de chauffage, en comparaison avec une chaudière ou une thermopompe.

Malgré une opération jugée simple à comprendre, l'optimisation de l'opération de l'unité est plus laborieuse. Tel que l'a évoqué le participant #1 : « Ce n'est pas tant compliqué à opérer. Côté contrôle, ce n'est pas compliqué non plus. C'est juste de savoir comment l'optimiser. ». Cette difficulté à optimiser l'opération de l'appareil semble émaner, au moins partiellement, du changement de paradigme nécessaire à l'implantation de toute technologie de stockage : la **commande prédictive** (voir la section 1.1.2) et d'une absence de méthode ou de procédure spécifiquement prévue à cette fin. Ainsi, après la mise en service, les opérateurs rapportent procéder par essai-erreurs et faire des comparaisons entre les stratégies utilisées sur différents sites pour optimiser les séquences de contrôle et corriger les enjeux d'opération au fur et à mesure qu'ils surviennent. Il est rapporté par les participants que ce rodage des séquences de contrôle prend du temps par rapport à d'autres équipements de chauffage, telles les chaudières, et ce, surtout lors d'une première expérience d'opération d'un accumulateur. Or, les équipements auxquels les opérateurs comparent l'accumulateur ont comme point commun qu'ils peuvent en tout temps fournir leur pleine puissance de chauffage pour répondre à un besoin. Cela est différent d'un équipement de stockage thermique pour lequel la capacité dépend du niveau d'énergie contenu dans l'appareil et donc du profil de charge et de décharge passé. Le participant #1 soutient que la durée et le déroulement de cette période de rodage sont spécifiques à chaque bâtiment. Selon les expériences rapportées et avec les méthodes actuellement utilisées, elle est habituellement complétée après 1 à 2 hivers d'opération et fortement liée à l'opération des autres équipements de chauffage en place.

La courbe du niveau d'énergie ciblée en fonction de la température extérieure semble être la composante qui requiert le plus de temps à ajuster, exigeant parfois des ajustements au-delà du premier hiver d'opération. Concrètement, l'énergie ciblée se traduit par la consigne de températures imposée aux briques. Le participant #1 mentionne : « Il y a des projets qu'on l'a ajusté et on n'y a jamais retouché. Dans d'autres projets, on n'a pas encore trouvé la bonne courbe. ». Pour les participants #1 et 5, utiliser une prévision de température extérieure via une station météo a facilité l'ajustement de cette courbe. En utilisant une prévision de température, une **commande prédictive**, les besoins thermiques du bâtiment peuvent être prévus à l'avance et de manière plus juste qu'avec une lecture de la température extérieure actuelle. L'importance du choix de cette courbe est due au fait qu'elle influence à la fois l'efficacité de l'unité et sa disponibilité ; augmenter la quantité d'énergie ciblée assure que la capacité de décharge sera présente, mais augmente les pertes thermiques de l'unité.

Bonne pratique 3:

Que les opérateurs et professionnels emploient une prévision de la température extérieure minimale anticipée le jour suivant plutôt que la température actuelle pour fixer le niveau d'énergie ciblé des ATC.

Les valeurs par défaut de l'accumulateur laissent la logique interne de celui-ci déterminer l'énergie ciblée. Ce mode, nommé « Intellicharge », déterminera l'énergie ciblée en fonction de la température extérieure actuelle et de la quantité d'énergie consommée pour la charge de l'ATC durant les six dernières heures. Or, certains détails sur l'utilisation efficiente de ce mode de contrôle sont absents de la documentation technique. Par exemple, en l'absence de demande de décharge de l'ATC pendant plus de 22 heures (p. ex. la fin de semaine), l'énergie ciblée sera revue à la baisse par la logique interne de l'appareil. Il est difficile pour les opérateurs d'envisager ce qui se passera concrètement dans une telle situation et de planifier la reprise du système en conséquence.

Conséquemment, les participants interrogés imposent à l'accumulateur l'énergie à cibler via le système de gestion du bâtiment (BMS). Ils peuvent ainsi ajuster eux-mêmes la relation fixant l'énergie ciblée en fonction de la température extérieure. Les combinaisons de paramètres de contrôle appropriées pour une telle utilisation ne sont pas clairement établies dans la documentation de l'appareil, ce qui a créé de la confusion dans certains des sites étudiés (voir la Section 4.2.2). Le participant #3 rapporte notamment que la logique de contrôle interne de

l'accumulateur prévue sur certains de ses sites entrain parfois en conflit avec la séquence de contrôle programmée dans le BMS. Les méthodes déployées dans les différents sites de l'étude pour fixer la cible d'énergie à accumuler sont rapportées en détail à la Section 4.2.2.

Recommandation 1 :

Que le manufacturier supplémente sa documentation technique d'une explication détaillée des divers modes de fonctionnement offerts par l'accumulateur et/ou propose des combinaisons de paramètres recommandées pour divers modes d'opération attendus.

Les participants interrogés rapportent avoir modifié la relation entre l'énergie ciblée et la température extérieure pour deux raisons, soient pour :

- Optimiser la consommation énergétique de l'accumulateur en évitant de maintenir inutilement les briques à une température élevée trop longtemps (#1, #3, #5, #8) ;
- Augmenter la quantité d'énergie ciblée afin d'assurer une capacité de chauffage suffisante au bâtiment pendant la décharge (#1, #2, #4, #5).

Dans le premier cas, l'expérience vécue par les participants n'a généralement pas amené d'autres problématiques d'opération et de maintenance. À l'inverse, les participants #2 et 4, qui ont modifié la relation entre l'énergie ciblée et la température extérieure dans le but d'augmenter la capacité de chauffage disponible, rapportent avoir vécu des bris hâtifs d'éléments chauffants. Le participant #2 associe le fait que la consigne d'énergie ciblée a été maintenue élevée (température de consigne des briques >700°C) et constante pendant huit saisons, aux bris précoces d'éléments chauffants sur un de leurs deux accumulateurs. Après le remplacement, il a pris la décision de faire réviser la stratégie de contrôle par une firme externe. Le participant #4 utilise une consigne d'énergie ciblée mensuelle et rapporte devoir remplacer « fréquemment » les éléments chauffants de ses unités. Au contraire, le participant #1, qui a évoqué la même raison de modification, n'a pas vécu de problématique avec les éléments chauffants. Il appert de noter que contrairement aux participants #2 et 4, les stratégies utilisées sur les sites de ce participant lient l'énergie ciblée à la température extérieure minimale anticipée pour le lendemain (voir la Section 4.2.2). Le participant #10 soutient pour sa part que le maintien prolongé d'un ATC à haute température, dans la gamme de 700-800°C, est l'une des principales causes de la fissuration accélérée des briques sur un site qu'il a expertisé.

Ces expériences rapportées par les participants indiquent que certains paramètres de la stratégie de contrôle peuvent avoir un impact sur la durée de vie des composants. Il est important de souligner que cet impact n'est pas facilement perceptible par les opérateurs lors de leur première expérience. Cet impact n'est pas explicitement mentionné dans la documentation du manufacturier qui s'applique à la génération d'ATC opérée par les participants interrogés. En effet, aucune recommandation concernant les paramètres ou les méthodes à préconiser pour choisir une stratégie de contrôle, tant pour l'opération efficiente que pour maximiser la durée de vie des composants, ne sont abordées dans les précédentes versions de la documentation. Le manufacturier a récemment incorporé quelques recommandations permettant de maximiser la durée de vie des éléments chauffants dans une nouvelle version de la documentation applicable à la génération d'ATC fabriqué après juin 2020. Il est important de noter que les deux versions de la documentation sont toujours disponibles sur le site web du manufacturier, ce qui peut entraîner de la confusion pour de futurs opérateurs. Le manufacturier recommande notamment de s'assurer que la température maximale autorisée des briques est appropriée pour l'utilisation recherchée, soit 760°C pour une utilisation comme source principale de chauffage et 704°C pour une utilisation comme source d'appoint, et de minimiser les périodes prolongées à haute température (Steffes, s.d.). Le manufacturier mentionne également que les relais à semiconducteurs (ou *solid-state relays*, SSR, en anglais) permettent de contrôler la vitesse à laquelle l'ATC est rechargé, ce qui augmente la durée de vie des éléments chauffants. Ces SSR sont intégrés à même l'ATC fabriqué après juin 2020, alors qu'un panneau de relais SSR était vendu en option pour les générations précédentes. La plupart des participants interrogés en avaient fait installer, jugeant les SSR essentiels pour gérer la demande d'électricité à une fréquence supérieure à la période d'intégration de 15 minutes d'Hydro-Québec. Ainsi, l'expérience d'opération vécue par les participants interrogés, spécifiquement l'impact de certains paramètres de la stratégie de contrôle sur la durée de vie des composants, est cohérente avec l'évolution de la technologie et de la documentation technique

de la nouvelle génération d'ATC. Plus de détails sur la durée de vie des composants seront présentés à la Section 3.2.2.

Bonne pratique 4:

Que les opérateurs et les professionnels s'assurent de ne pas maintenir l'ATC à haute température (>700°C) pendant des périodes prolongées.

D'autres difficultés ayant eu lieu durant la phase de rodage des ATC ont été rapportées par quelques participants, indiquant un certain manque d'expertise de la part des professionnels en contrôle avec un équipement qui demande à être contrôlé de manière prévisionnelle plutôt que réactionnelle. Ces difficultés sont liées à la gestion d'événements inattendus dans la séquence de contrôle. Par exemple, la séquence de reprise après une panne d'électricité a dû être modifiée par le participant #8, car celle-ci ne permettait pas de redémarrer correctement l'ATC s'il était en décharge au moment de la panne. Une méconnaissance des commandes envoyées à l'ATC prenant acte sur des changements de valeur serait en cause selon lui. L'atteinte de haute limite de température dans l'échangeur de chaleur causée par l'arrêt de la pompe avant le ventilateur et exigeant un réarmement manuel de l'ATC a été rapportée par les participants #6 et 8. Finalement, le participant #1 a demandé que la perte soudaine de communication entre le BMS et la station météo donnant la prévision de température puisse être gérée de façon automatisée.

Bonne pratique 5:

Que les opérateurs et les professionnels prévoient une séquence de contrôle spécifique permettant la gestion automatisée des événements hors du fonctionnement normal du bâtiment.

Au-delà de la période de rodage, les participants rapportent avoir eu de la difficulté à identifier l'opération problématique d'un accumulateur. Les codes d'erreurs fournis par l'ATC sont limités à la détection de quelques défaillances spécifiques de composants de l'appareil⁵. Les sites étudiés font très peu usage de ces codes d'erreur dans les séquences de contrôle. C'est plutôt les **extrants** de l'ATC (p. ex. le niveau d'énergie ciblé du noyau, le niveau d'activation du ventilateur, la température moyenne de chaque noyau, le nombre d'éléments actifs dans chaque noyau, etc.) qui sont utilisés pour détecter une opération sous-optimale ou pour optimiser son fonctionnement. Des processus de vérification manuelle sont employés, au moment où le fonctionnement sous-optimal est suspecté par l'opérateur et non pas une détection de faute automatisée et affichée sur l'interface du BMS. Le participant #3 résume l'enjeu en indiquant que lorsqu'une séquence non optimale est en place : « l'accumulateur va fonctionner pareil ». Ce manque de rétroaction sur l'opération de l'accumulateur rend aussi la tâche difficile aux opérateurs lorsque vient le temps d'identifier la cause d'une défaillance technique et l'expertise requise pour y pallier (contrôle, électricien, plomberie, tuyauteur).

Bonne pratique 6:

Que des séquences exploitant les extrants de l'accumulateur soient implémentées dans le BMS et son interface pour détecter et diagnostiquer les défaillances de composants, tels les éléments chauffants et le moteur du ventilateur.

En somme, les participants rapportent que l'ATC est une technologie accessible par les opérateurs de bâtiments institutionnels et facile à mettre en place, en substitution de chaudières au combustible. Toutefois, une expérience significative est requise pour qu'une séquence d'opération appropriée soit trouvée rapidement. Parmi les enjeux à anticiper, en l'absence de changements au niveau de détail des séquences développé lors de la conception, l'optimisation de la relation de l'énergie ciblée en fonction des conditions extérieures s'étalera sûrement au-delà de la 1re saison de chauffage.

⁵ P. ex. des sondes de température affichant des lectures hors de leur plage habituelle ou une carte de contrôle des relais à étalonner.

3.2.2 Maintenance des accumulateurs

Les enjeux d'opération des accumulateurs discutés précédemment ont, dans quelques cas, vraisemblablement mené à des enjeux d'entretien et de maintenance. Les participants #2, 4 et 5 qui ont modifié la courbe d'énergie ciblée en fonction de la température extérieure pour augmenter la capacité de chauffage disponible ont connu des bris d'éléments chauffants. Outre le fait de devoir remplacer certains composants, l'expérience rapportée par les participants indique que l'absence d'information sur la nature des composants les plus susceptibles de briser, leur coût, le temps de main-d'œuvre requis et la fréquence de remplacement à prévoir complique l'entretien des accumulateurs à divers niveaux. Premièrement, en l'absence de telles informations et particulièrement lors d'une première expérience avec la technologie, il est difficile pour l'opérateur de prévoir et de justifier le budget à allouer pour l'entretien des accumulateurs. Ensuite, il est difficile de planifier l'opération du réseau de chauffage en cas de mise hors service de l'accumulateur en ne sachant pas le temps que vont nécessiter les réparations. Conséquemment, afin de supporter les opérateurs dans la planification de l'entretien de futures installations, le Tableau 6 répertorie les principaux composants d'un accumulateur et les remplacements qui ont été rapportés par les participants interrogés.

Tableau 6: Informations sur les remplacements de composants des accumulateurs tirées des entrevues O&M

Composants	ID.	Nb. ATC	Type	Coût approx. (\$)	Fréquence	Temps approx.
Moteur de ventilateur	#1	n.d.	C-R	500-600	Aux 2-3 ans	2-3 h
	#2	1	C	n.d.	Après 7 ans	3 h
	#3	n.d.	C	n.d.	Après 10 ans	1,5 h
	#4	~4-5	C	1 000	Après 2-5 ans	2 h
	#5	n.d.	C	n.d.	n.d.	n.d.
	#7	2	C	n.d.	n.d.	n.d.
	#8	n.d.	C-R	1 000	Aux 2-3 ans	n.d.
	#11	1	C	n.d.	Après 1 an	n.d.
	#12	1	C	n.d.	Après 1 an	n.d.
	#13	4	C	800	Après ~6 ans	4 h
Éléments chauffants ¹	#2	1	C	15 000/18 un.	Après 8 ans	1-1,5 jrs/18 un.
	#5	n.d.	C	800/un.	Après 8-10 ans	2 h/un.
Éléments chauffants et isolant ²	#4	3	C-R	12 000-15 000/12 un.	Après 8-10 ans	1-2 jrs/12 un.
Briques	#10	~2	D	n.a.	Après ~15ans	n.a.
Pompe	#1	1	C	n.d.	Après 3 ans	n.d.
Condensateur du moteur de ventilateur	#1	n.d.	P	10	Chaque année	1 h
Fusibles	#1	n.d.	P	n.d.	Chaque année	n.d.
Sonde de température des briques	#1	1	C	n.d.	Après 3 ans	n.d.
Sonde de haute limite de température dans l'échangeur	#6	3	C	100	Après 4-6 ans	1 h
Contrôleur BACnet	#7	1	C	1 100	n.d.	n.d.
Panneau élec. et ses composants						
Panneau SSR et ses composants						
Sonde de température de l'eau à la sortie						
Échangeur de chaleur						
Composants de plomberie (ex.: valve, réservoir d'expansion)						

¹Une unité (un.) correspond à une paire d'éléments chauffants. Le modèle 9180 comprend 18 paires d'éléments chauffants.

²Le coût et le temps approximatifs sont pour le remplacement des éléments chauffants (1 un. = 1 paire) et de l'isolant.

Dans le Tableau 6, la colonne « Type » indique si le remplacement fut effectué à titre curatif (C) ou préventif (P) et si le participant a qualifié le remplacement de récurrent (R). La lettre D indique que le composant défaillant, en l'occurrence les briques réfractaires, n'a pas été remplacé, mais que l'accumulateur en entier a été démantelé (D) étant donné son état général, son âge et le coût de remplacement approchant le coût d'achat d'un nouvel accumulateur. Le coût approximatif des composants indiqué est celui rapporté par les participants, sans aucune correction relative à l'inflation et aux frais de transport. La colonne « Fréquence » indique la période d'utilisation du composant avant son remplacement. La dénomination « aux » est utilisée pour des remplacements jugés récurrents par les participants, « après » est utilisé pour des remplacements ponctuels et « chaque année » est utilisé pour des remplacements effectués annuellement de façon préventive. La colonne « Temps approx. » indique le temps approximatif de main-d'œuvre à prévoir pour le remplacement, tel que rapporté par les participants. Les cellules grises dans le tableau indiquent qu'aucun remplacement de ces composants n'a été mentionné par les participants aux entrevues.

Le Tableau 6 indique que le moteur du ventilateur est le composant qui a été remplacé sur le plus grand nombre d'accumulateurs. Dix des treize participants interrogés ont rapporté avoir eu à le remplacer avec un coût de remplacement entre 500 et 1 000\$ et nécessitant entre 1,5 et 4 heures de travail. Certains remplacements ont été nécessaires après une courte période d'opération variant entre 1 et 3 ans (#1, 4, 8, 11 et 12), alors que d'autres ont été remplacés après 6 années et plus d'utilisation (#2, 3 et 13). Les participants #1 et 8 ont qualifié le remplacement de ce composant de récurrent et même à prévoir après 2 à 3 années, alors que les participants #11 et 12 attribuaient le remplacement à une défaillance initiale du composant étant donné sa faible période d'utilisation. Dans le cas du participant #2, il a attribué le bris du moteur à une pièce qui s'est détachée et qui a bloqué sa rotation. Certains participants ont également mentionné que l'encrassement du ventilateur et du moteur avec le temps peut impacter sa durée de vie. Les causes probables menant aux bris de moteurs de ventilateur sont donc diverses. Elles semblent néanmoins se diviser en trois : (c.1) le moteur avait une défaillance quelconque dès la mise en service de l'ATC (#11 et 12) ; (c.2) l'état du moteur s'est dégradé dans le temps et aurait pu être corrigé par un entretien préventif ; et (c.3) le problème est récurrent après 2 à 3 années d'utilisation et possiblement lié à l'opération à bas régime du ventilateur pendant la décharge lors d'une opération comme **source principale** de chauffage (#1 et 8).

Une défaillance dès la mise en service (c.1) rappelle l'importance de faire un suivi serré de l'opération dans les premiers temps pour bénéficier de la garantie du manufacturier. Pour appuyer l'importance de la mise en service, le participant #6 rapporte avoir constaté, après 5 ans d'opération, que les ventilateurs des cinq ATC de son CSS étaient désaxés, réduisant potentiellement la capacité des ATC à se décharger. Son hypothèse est que ce mauvais alignement des ventilateurs datait de la mise en service, car il était présent sur tous les ATC et que ceux-ci ont été installés dans le cadre du même projet. Ce participant a corrigé l'alignement des ventilateurs lorsqu'il s'en est aperçu, soit 5 ans après la mise en service, ce qui témoigne que des lacunes de mise en service peuvent perdurer longtemps sans que des signes clairs de sous-performance ne soient visibles pour l'opérateur. En date de l'entrevue, le participant n'avait pas pu vérifier si la capacité de décharge des ATC avait augmenté à la suite de cette intervention. Les autres participants n'ont pas rapporté de telles observations sur l'alignement du ventilateur.

La dégradation progressive de l'état du moteur (c.2) peut être corrigée par un entretien préventif annuel qui devrait notamment porter sur l'inspection du ventilateur et de son moteur, son état général de propreté, de lubrification et de solidité des éléments de fixation. L'apparence de surchauffe, pouvant être indiquée par la décoloration de l'habillage du moteur, par la fusion des gaines des câbles ou par la présence de terminaisons endommagées, signale qu'une intervention est requise et qu'un remplacement de moteur sera à prévoir.

En ce qui concerne les remplacements récurrents (c.3) rapportés par les participants #1 et 8, ils mentionnent qu'ils se produisent même en effectuant un tel entretien préventif sur le moteur chaque année. Ces participants mesurent également le courant appelé, la capacitance du condensateur et la résistance électrique du bobinage du moteur. Ces mesures les amènent à mettre en cause la modulation de la vitesse du ventilateur qui est commandée par la logique de contrôle de l'accumulateur pendant la décharge et qui est difficilement modifiable pour l'opérateur. Ils ont constaté que le courant appelé par le moteur est supérieur à son courant nominal lorsqu'il fonctionne à basse vitesse, ce qui cause son échauffement. Le moteur du ventilateur étant refroidi par convection naturelle, il est également important de s'assurer que les dégagements et la température maximale de 29°C dans la salle mécanique recommandés par le manufacturier sont respectés. Des périodes prolongées d'opération à basse vitesse sont en outre susceptibles de se produire lorsque l'ATC est utilisé comme principale source de chauffage, tel qu'illustré à la

Figure 12 où le ventilateur opère à bas régime durant 3 jours consécutifs pour combler une faible demande de chauffage, accentuant le problème.

Bonne pratique 7:

Que la stratégie de contrôle ne porte pas le ventilateur de l'ATC à fonctionner à bas régime pendant une durée prolongée, dans le but de maximiser la durée de vie du moteur.

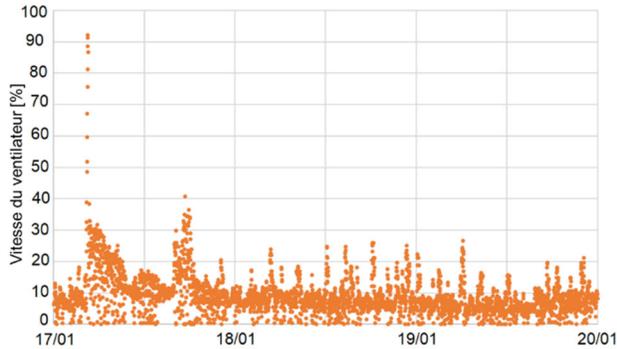


Figure 12: Vitesse du ventilateur de l'ATC1, site #3, 17 au 20 janvier 2021

Plusieurs des accumulateurs sous la charge de ces participants sont utilisés comme système principal de chauffage, entraînant un grand nombre d'heures d'opération. Ces participants n'avaient pas identifié de solution durable au moment de l'entrevue et anticipent que d'autres bris de moteurs vont survenir. Les solutions adoptées jusqu'à présent sont de s'assurer de garder un moteur comme pièce de rechange, d'effectuer un entretien préventif annuel et de faire reconditionner le moteur lorsque possible afin de réduire le coût de remplacement.

Bonne pratique 8:

Que les opérateurs utilisant l'ATC comme source principale de chauffage prévoient garder un moteur de ventilateur en inventaire pour un remplacement curatif imprévisible.

Des remplacements d'éléments chauffants et d'isolant ont été rapportés par les participants #2, 4 et 5. Comme discuté précédemment, l'opération des accumulateurs à haute température pendant des périodes prolongées et continues a un impact sur la durée de vie des éléments chauffants. Cet aspect relevant de l'opération est important pour l'entretien puisque le coût matériel rapporté (entre 12 000 et 15 000\$ selon le nombre d'éléments et le remplacement ou non de l'isolant) et le temps de main-d'œuvre requis (1 à 2 journées) sont élevés. Les coûts totaux d'une telle intervention sont donc importants par rapport au coût d'achat de l'ATC qui varie entre 30 000 et 45 000\$, selon le modèle. Un document produit par le manufacturier, mais difficile à obtenir même sur demande (Steffes, 2016), mentionne aussi certaines conséquences que les défaillances d'éléments chauffants peuvent avoir sur d'autres composants, soit les autres éléments encore fonctionnels, la couverture isolante, le panneau isolant rigide et les sondes de température des briques. Ainsi, les coûts de réparation pourraient être encore plus importants que ceux rapportés par les participants. Puisque l'ATC ne rapporte aucun renseignement permettant de juger de l'état des éléments chauffants, la détection précoce du problème est aussi difficile pour les opérateurs. Le manufacturier indique la procédure détaillée à suivre pour évaluer la résistance électrique des éléments et s'assurer de leur état de fonctionnement dans le document mentionné précédemment (Steffes, 2016) et une version condensée de cette procédure a été ajoutée dans la nouvelle version du manuel d'utilisation et d'installation (Steffes, 2020). Cette procédure exige de retirer le panneau extérieur et de soulever la couverture isolante, ce qui sous-entend qu'elle doit être faite lorsque la température des briques est relativement basse, par exemple avant le démarrage de la saison de chauffage. Trois participants (#1, 4 et 5) ont mentionné inclure la mesure de la résistance électrique des éléments chauffants dans leur procédure interne effectuée annuellement. Ils utilisent toutefois une méthode différente de la procédure recommandée par le manufacturier qui ne requiert pas d'accéder directement aux briques et aux éléments chauffants ; ils mesurent plutôt la résistance électrique via le panneau électrique de l'ATC.

Il semble y avoir une réticence de la part des participants de retirer le panneau extérieur de l'ATC pour accéder aux éléments chauffants que ce soit pour vérifier leur résistance ou pour effectuer un remplacement. Celle-ci pourrait venir d'une crainte d'abîmer la couverture isolante, d'une méconnaissance de la technique appropriée, du temps et du nombre de personnes requis pour le faire. Le participant #5 relate que le personnel interne du CSS a eu à remplacer des éléments chauffants et procédait à une ouverture annuelle des ATC lors de l'entretien préventif. Il a indiqué qu'après en moyenne trois ouvertures, la couverture isolante devenait friable et craquait. Selon son expérience, celle-ci s'assèche au fil du temps et avec l'exposition à des températures élevées. Il a ensuite opté pour une ouverture des ATC aux trois ans environ, ou avant si besoin, plutôt qu'une ouverture annuelle. Comme mentionné précédemment, les défaillances d'éléments chauffants qu'ont connu certains ATC de ce CSS peuvent également avoir eu des répercussions sur l'état de la couverture isolante. En ce sens, une méthode alternative de vérification des éléments chauffants pouvant être effectuée annuellement, rapidement et par une seule personne avec les qualifications requises semble être plus appropriée à la réalité des opérateurs. Celle-ci est présentée en annexe.

Bonne pratique 9:

Que les opérateurs priorisent la vérification de l'état des éléments chauffants via le panneau électrique plutôt qu'en ouvrant l'appareil.

Cette méthode alternative est partielle, puisqu'elle ne permet pas de vérifier l'état des autres composants à l'intérieur de l'ATC. Sur ce point, il serait également souhaitable de mieux exploiter les extrants de l'appareil pour détecter et diagnostiquer les défaillances et/ou bris de composants. En prévoyant l'ajout de mesurage de la puissance électrique appelée par l'accumulateur, les **extrants** de l'accumulateur⁶ permettraient d'effectuer un calcul de la puissance électrique appelée de l'accumulateur et de le comparer à la valeur mesurée. Une telle comparaison effectuée au niveau du BMS permettrait un diagnostic automatisé et en continu du nombre d'éléments chauffants défaillants (Bonne pratique 6). Similairement, vérifier que la température des briques diminue pendant la décharge, lorsqu'il n'y a pas simultanément de charge, permettrait de déceler et d'avertir l'opérateur d'une défaillance du ventilateur.

Il est important de souligner que la durée totale de mise hors service de l'ATC lors du remplacement d'éléments chauffants et d'isolant excède largement le strict temps nécessaire au remplacement indiqué au Tableau 6. Les briques de l'accumulateur doivent se refroidir avant de remplacer les éléments et plusieurs heures sont également requises après la remise en marche pour atteindre la température de briques ciblée. Un remplacement d'éléments chauffants est donc une intervention majeure qui affecte la disponibilité de l'ATC pour plusieurs jours. Ainsi, pour plusieurs participants, un certain nombre d'éléments défaillants doit être atteint afin de justifier leur remplacement et de remplacer l'isolant au besoin par la même occasion. L'expérience vécue par les participants #2 et 4 témoigne que les remplacements ont été faits lorsqu'au moins la moitié des éléments étaient défaillants et qu'à ce moment, ils ont tous été remplacés. Le participant #2 a mentionné avoir eu une assistance technique adéquate de la part du distributeur pour que l'électricien du CSS puisse procéder au remplacement. Dans son cas, l'isolant n'a pas eu à être remplacé. Le participant #4 fait quant à lui affaire avec une firme externe qui lui a été référée par le distributeur pour remplacer les éléments chauffants et l'isolant des accumulateurs. Le participant #5 rapporte pour sa part que le personnel interne du CSS a procédé à des remplacements d'éléments chauffants, mais qu'il ne remplaçait pas tous les éléments chauffants d'un ATC au cours d'une même intervention. Comme mentionné précédemment, il a modifié ses pratiques d'entretien pour effectuer cette intervention environ aux trois ans plutôt qu'annuellement afin de préserver l'état de la couverture isolante. Selon son expérience d'opération et l'utilisation d'ATC comme outil de gestion de pointe, une unité de 80 kW (modèle 9180) avec 4 ou 5 paires d'éléments chauffants défaillants sur 18 justifiaient un remplacement dans l'année courante, puisque le temps de charge requis pour atteindre l'énergie ciblée était devenu trop long. Cela indique indirectement que ces remplacements unitaires d'éléments chauffants ne sont pas requis à une grande fréquence et que, pour les sites en question, les ATC peuvent continuer d'opérer durant plusieurs saisons hivernales suite à la défaillance de certains éléments. Il appert de préciser que dans le cas du participant #5, des bris d'éléments chauffants sont survenus sur plusieurs ATC après une ou deux années d'opération

⁶ Le niveau d'énergie ciblée du noyau (L108), le niveau d'activation du ventilateur (L120), la température moyenne de chaque noyau (L137 à L139) et le nombre d'éléments actifs dans chaque noyau (L147 à L149).

seulement et étaient attribuables à de mauvaises techniques d'installation. En effet, durant les premières années d'implémentation des ATC (~2006), les techniciens qui procédaient à l'installation des briques et des éléments chauffants n'avaient pas encore reçu de formation spécifique à cette fin. Cette problématique a été adressée peu de temps par la suite avec l'accréditation de techniciens par le manufacturier et n'est donc pas susceptible de se reproduire lors de futures installations. Les autres participants interrogés, pour lesquels les installations d'ATC ont commencé en 2008 avec le participant #3, n'ont pas connu de bris d'éléments chauffants après si peu d'années d'utilisation. Dans son document détaillé disponible sur demande (Steffes, 2016), le manufacturier indique plusieurs précautions à prendre lors du remplacement d'éléments chauffants qui seraient utiles pour des opérateurs prévoyant faire remplacer des éléments chauffants. Des indices visuels suggérant le remplacement de tous les éléments chauffants sont également mentionnés dans ce même document. Malgré tout, les participants #1 et 3, parmi ceux ayant le plus de sites avec des accumulateurs et le plus grand nombre de saisons de chauffage complétées, n'ont pas rapporté de défaillances majeures d'éléments chauffants.

Outre les remplacements de moteurs de ventilateur, d'éléments chauffants et d'isolant, le remplacement d'une pompe, d'une sonde de température des briques, de trois sondes de haute limite de température de l'échangeur et d'une carte de contrôle BACnet ont été soulevés. Ces remplacements n'ont pas fait l'objet d'une analyse plus approfondie étant donné le faible nombre de mentions de la part des participants interrogés et le manque d'information sur les causes probables de ces bris. Des condensateurs du moteur de ventilateur et des fusibles ont été remplacés de manière préventive par le participant #1 sur plusieurs accumulateurs. Les remplacements récurrents de moteurs de ventilateur au fil des ans l'ont amené à tester le condensateur du moteur et à le remplacer de manière préventive lors de l'entretien annuel, étant donné son coût et le temps de remplacement moindres.

Les stratégies d'entretien préventif des participants (#1, 4 à 7) ont essentiellement été élaborées au fil des ans, au fur et à mesure que des remplacements se sont avérés nécessaires. Comme discuté précédemment, leur entretien préventif annuel porte sur l'inspection, le nettoyage et la lubrification du moteur de ventilateur et la mesure de la résistance électrique des éléments chauffants. Les vérifications usuelles de démarrage de début de saison portent sur l'activation de la pompe et du ventilateur lors de la décharge. Le participant #1 vérifie également sur une base annuelle l'état du condensateur et des fusibles. De plus, lorsque l'accumulateur est en marche pendant la saison de chauffage, il utilise une caméra infrarouge afin de détecter de mauvaises connexions électriques qui doivent être resserrées. Les connexions dans le panneau de relais SSR sont fréquemment resserrées lors de cette inspection. Les participants #2 et 3, qui travaillent aussi pour des CSS, mentionnent ne pas avoir adopté de pratiques d'entretien préventif spécifiques aux accumulateurs parce que les ressources humaines et budgétaires à l'interne ne le permettent pas. Le participant #2, qui a eu à remplacer des éléments chauffants, a préféré faire réviser annuellement la séquence de contrôle par une firme externe que de miser sur une stratégie d'entretien préventif à l'interne, faute de ressources. Pour sa part, le participant #3 a rapporté peu de remplacements de composants, ce qui porte à croire qu'il ne juge pas nécessaire d'allouer des ressources à l'entretien préventif.

La documentation du manufacturier s'appliquant à la génération d'ATC opérée par les participants interrogés n'inclut aucune recommandation formelle sur l'entretien préventif. Un tel état des lieux n'a pas encouragé les participants à adopter des pratiques préventives d'entretien avant que des problématiques surviennent et que des remplacements soient nécessaires. Lors d'une première expérience avec la technologie, il leur fut donc difficile de savoir sur quels aspects devrait porter l'entretien préventif, de prévoir et de justifier les ressources à allouer pour le faire. À ce sujet, le participant #4 a mentionné que l'entretien préventif d'un accumulateur n'est pas aussi évident à envisager que celui d'une chaudière au combustible qui va nécessairement demander une inspection et un nettoyage fréquent. Cette lacune a été partiellement adressée par le manufacturier puisqu'une procédure d'entretien préventif annuelle est maintenant incluse dans la plus récente version du manuel d'utilisation et d'installation, s'appliquant à la nouvelle génération d'ATC fabriquée après juin 2020. Cette procédure reprend des pratiques préventives qui ont été adoptées par les participants interrogés au fil des ans, ce qui appuie le fait que l'expérience vécue des opérateurs est pertinente à l'amélioration des pratiques futures. Toutefois, la procédure proposée par le manufacturier ne spécifie aucune action d'entretien préventif sur le moteur de ventilateur, le composant qui a connu le plus grand nombre de bris parmi les participants interrogés et pour lequel plusieurs ont adopté une routine de nettoyage, de lubrification et d'inspection préventive. Pour poursuivre l'amélioration des pratiques d'opération et de maintenance des ATC, une fiche synthèse sur les pratiques d'entretien préventif à adopter, basée sur les recommandations du manufacturier et sur l'expérience vécue des participants interrogés, est proposée en annexe.

Les pratiques d'entretien préventif adoptées par certains participants (#1 et 4) font partie de leurs recommandations à de futurs opérateurs pour assurer une opération efficiente. Le temps, l'ampleur et la complexité de ces pratiques peuvent s'apparenter à celles d'une chaudière électrique selon le participant #1 et sont nettement moindres que celles requises pour une chaudière au combustible d'après le participant #4. Ce dernier mentionne toutefois que les remplacements curatifs de composants, spécifiquement les éléments chauffants et l'isolant, sont plus onéreux que les réparations qui ont été faites sur leurs chaudières au combustible. D'après les entrevues, le principal obstacle à l'entretien préventif des accumulateurs est le manque de ressources à l'interne.

Bonne pratique 10 :

Que les opérateurs prévoient les ressources nécessaires pour effectuer des interventions de maintenance préventive de façon annuelle, en fonction des pratiques recommandées dans la fiche présentée en annexe.

En somme, bien qu'il fut impossible de quantifier formellement l'impact de divers modes d'opération sur la durée de vie des composants, le lien est assez largement rapporté tant par les participants aux entrevues que par le manufacturier, pour être considéré comme une mise en garde sérieuse. Sachant que les configurations à préconiser ne sont pas clairement définies dans la documentation technique du manufacturier, l'expertise technique des professionnels se chargeant de la stratégie de commande-contrôle de l'ATC est primordiale. Un suivi prolongé de la performance de l'unité est également à prévoir, s'étalant au minimum sur une saison de chauffage suivant sa mise en marche. Particulièrement, il est recommandé de s'assurer que la stratégie d'opération utilisée ne porte pas le ventilateur de l'ATC à fonctionner à bas régime pour des durées prolongées. Similairement, une attention particulière doit être portée à ce que l'énergie ciblée et la quantité d'énergie déchargée quotidiennement ne maintiennent pas l'ATC à haute température (>700°C) pour de longues périodes.

Le Tableau 6 indique l'expérience des participants relativement aux remplacements de composants et inclut un ordre de grandeur des coûts des composants et du temps requis pour procéder à leur remplacement. Suivant les expériences rapportées, il semble être une bonne pratique de prévoir un budget annuel de maintenance préventive, et de garder un moteur de ventilateur en inventaire pour un remplacement curatif imprévisible, surtout si l'accumulateur est utilisé comme système principal de chauffage. Une fiche synthèse présentée en annexe résume les pratiques d'entretien préventif recommandées le manufacturier et celles adoptées par les participants interrogés.

Sachant les ressources humaines et matérielles limitées des opérateurs, il est recommandé de mieux exploiter les extrants de l'appareil pour détecter et diagnostiquer les défaillances de composants tels les éléments chauffants et le moteur du ventilateur. L'interface du BMS permettrait d'en avertir les opérateurs.

Recommandation 2 :

Que des séquences exploitant les extrants de l'accumulateur soient développées pour détecter et diagnostiquer les défaillances de composants tels les éléments chauffants et le moteur du ventilateur et rendues disponibles aux opérateurs.

3.3 Conception

Ce volet présente le retour d'expérience des professionnels ayant été impliqués personnellement dans la conception de projets d'implanter des accumulateurs thermiques électriques centraux dans des bâtiments institutionnels. Il vise à clarifier le processus de conception ; de l'identification des besoins et des contraintes du client et de son projet, à la production de plans et devis, en passant par les méthodes de calcul utilisées et les analyses de faisabilité technique et économique réalisées. À cette fin, des entrevues ont été menées auprès de concepteurs travaillant pour des firmes de génie-conseil et des ESE ayant participé à la conception de projets comprenant des ATC pour le secteur institutionnel. La plupart de ces projets étaient réalisés pour des CSS. L'expérience vécue et les leçons apprises par les concepteurs sont présentées ci-après afin d'identifier des pistes d'amélioration possibles pour la conception qui permettraient de faciliter le déploiement des ATC dans le secteur institutionnel. Les propos des participants aux entrevues sont anonymisés.

Le Tableau 7 présente les participants aux entrevues : cinq participants (#1 à 5) travaillent pour des firmes de génie-conseil, deux (#6 et 7) travaillent pour des ESE et un (#8) est chargé de l'exploitation de bâtiments d'une direction immobilière de la SQI. Ce dernier occupe un rôle qui relève principalement de l'opération et de la maintenance de bâtiments, mais il est également amené à se prononcer sur des aspects qui relèvent de la conception, autant avant la production des plans et devis que lors de leur révision. C'est pourquoi ses propos sont inclus dans cette synthèse d'entrevues. Il est à noter que certains participants ont complété leurs réponses, soit durant l'entrevue ou à la suite de celle-ci, avec le soutien de collègues de travail.

Tableau 7: Caractéristiques des participants aux entrevues – volet conception

ID.	Employeur	Implication en conception	Nb. bâtiments	Année du 1 ^{er} projet	Utilisation prévue de l'ATC
1	Firme de génie-conseil	CP ; CD	1	2018	Source principale
2		CP ; CD	1	2017	Source principale
3		CP ; CD	~8-10	2015	Gestion de pointe avec ChElect
4		CP ; CD	~40	~2006	Gestion de pointe avec ChElect
5		CP	~20-30	~2011	Gestion de pointe avec ChElect
6	ESE	CP ; CD	6	2015	Source principale
7		CP	n.d.	n.d.	Gestion de pointe
8	SQI-Exploitation	CP	4	2018	Gestion de pointe avec géothermie; Source principale

Le Tableau 7 indique l'implication des participants au niveau de la conception ; « CP » indique une expérience de conception préliminaire et « CD » une expérience de conception détaillée. La conception préliminaire vise à analyser les besoins du client, définir les objectifs et la portée du projet et réaliser des analyses sommaires de faisabilité technico-économique. La conception détaillée se déroule dans une étape subséquente. Elle inclut des calculs de dimensionnement et de coûts plus étoffés, la production des plans et devis et la définition de la séquence de contrôle. Le participant #8 est le seul qui a acquis une expérience de conception d'un projet comprenant un ATC dans un emploi précédent. Les autres participants ont vécu leur première expérience avec la technologie dans leur emploi actuel. Le nombre de bâtiments comprenant des ATC pour lesquels les concepteurs ont eu une implication personnelle, l'année de réalisation du premier projet et l'utilisation prévue de l'ATC sont également indiqués dans le tableau. Il est à noter que le mandat du concepteur peut s'étendre à plus d'un bâtiment et chaque bâtiment peut comprendre plus d'un ATC. L'utilisation prévue d'un ATC comme **source principale** de chauffage sous-entend également qu'il est utilisé comme équipement de gestion de pointe électrique liée au chauffage. On remarque que certains concepteurs ont mentionné utiliser l'ATC comme outil de gestion de pointe en combinaison avec une chaudière électrique (ChElect) ou avec de la géothermie.

Les concepteurs ont évoqué différents contextes de réalisation des projets. Ils sont similaires à ceux identifiés dans la synthèse des entrevues avec des gestionnaires de projets (Section 3.1), soient :

- la nécessité de remplacer des équipements désuets (chaudières, chaufferie en générale),
- la réalisation d'une transformation majeure d'un bâtiment, ou
- la construction de nouveaux bâtiments.

Tous les participants interrogés ont réalisé la conception de projets comprenant des ATC pour au moins un bâtiment existant, ceux-ci représentent la plus grande proportion des projets abordés durant les entrevues. Par leur nature, les projets réalisés par des ESE sont réalisés sur des bâtiments existants. Le participant #1 est le seul qui a réalisé la conception d'une transformation majeure de bâtiment dans le cadre de laquelle un ATC a été installé. Les participants #5 et 8 ont réalisé des projets dans de nouvelles constructions, comptant respectivement pour 75% et 50% des bâtiments pour lesquels ils ont eu une implication personnelle en conception.

Les objectifs des projets résumés par les concepteurs recourent ceux énumérés dans la Section 3.1, notamment (1) la volonté d'éliminer le mazout comme source d'énergie de chauffage et d'électrifier une part importante de celui-ci, (2) de gérer la pointe de demande d'électricité du bâtiment liée au chauffage et (3) de réduire les coûts d'exploitation. L'objectif 1 est motivé par l'exigence d'Exemplarité de l'État qui vise à retirer le mazout comme source de chauffage principale dans les bâtiments institutionnels et à limiter la consommation de combustible. Au-delà de

l'exigence, les clients sont de plus en plus sensibilisés à mettre en œuvre des projets qui réduisent les émissions de GES de leurs bâtiments et demandent plus fréquemment aux concepteurs de quantifier cette réduction, tel que rapporté par le participant #1. L'objectif 2 est conséquent avec l'électrification du chauffage. Les concepteurs travaillant pour des ESE (#6 et 7) insistent davantage sur l'objectif 3 qui est de réduire les coûts d'exploitation étant donné la nature de leurs mandats qui repose sur des économies d'énergie garanties et sur la proposition d'un projet dont la valeur actuelle nette (VAN) est la plus intéressante possible pour le client. Lorsque le projet est réalisé en mode traditionnel, la majorité des concepteurs concernés réalisent une analyse de rentabilité (#1, 3, 4 et 8) pour aider leurs clients à prendre une décision parmi les options proposées. Seul le participant #2 a mentionné ne pas avoir eu à faire d'analyse de rentabilité. Dans ce cas, une telle analyse ne faisait pas partie de son mandat et le client avait déjà pris la décision d'installer un accumulateur. Le participant #3 soulève également le besoin d'un de ses clients, un CSS, de réduire l'entretien des équipements et d'en faciliter l'opération dans le cadre d'un projet de retrait de mazout et de réfection de chaufferie : « Le projet était beaucoup axé sur la diminution des coûts d'entretien et l'opération avec le contrôle à distance des équipements ».

3.3.1 Conception préliminaire

Les entrevues ont permis d'identifier les circonstances qui ont mené au choix de l'ATC lors de la conception préliminaire. Dans certains cas, les concepteurs étaient contraints de spécifier un ATC à la demande de leur client. Les participants #1 et 2 l'ont spécifié dans un bâtiment existant pour leur client qui avait déjà une expérience antérieure d'opération de l'équipement. Le participant #8, chargé de l'exploitation de bâtiments, a aussi demandé aux professionnels de spécifier des ATC après avoir fait ses propres analyses technico-économiques. Il n'avait pas d'expérience d'opération d'ATC avant sa première demande aux professionnels, mais il avait acquis une expérience de conception d'un projet comprenant un ATC dans un emploi précédent. Les participants #4 et 5 ont quant à eux fait la conception de quelques projets où le client connaissait la technologie et souhaitait que la pertinence et la faisabilité d'installer un ATC soient évaluées. Ils ont aussi proposé l'installation d'ATC à des clients qui ne connaissaient pas la technologie.

Dans les autres cas, les raisons justifiant l'installation d'un ATC étaient multiples. Un ensemble de circonstances et d'objectifs ont mené au choix de l'équipement. Tel que mentionné par le participant #6 : « La décision d'aller de l'avant avec les accumulateurs était motivée par le fait que c'était la seule solution viable avec les critères imposés par le client qui permettait de maintenir des coûts d'opération viables. C'était un "no-brainer" et la question était de savoir combien d'accumulateurs il fallait installer, plutôt que s'il fallait en installer. ». Les participants ont mentionné les circonstances suivantes qui justifient l'adoption de la technologie et qui sont liées au besoin de leurs clients de mettre en place des mesures de gestion de la demande d'électricité (objectif 2) :

- L'appel mensuel de puissance électrique est facturé au client (#7 et 8).
- La masse thermique du bâtiment est insuffisante pour délester significativement le chauffage en période de pointe (#8).
- Le client ne souhaite pas utiliser du combustible comme source d'appoint en période de pointe (#6).
- La puissance électrique moyenne du bâtiment varie d'au moins 50 kW entre la période occupée et inoccupée, permettant de charger l'accumulateur (#3, 5, 7 et 8).
- La combinaison des entrées électriques du bâtiment était possible, tant sur le plan technique que budgétaire, ce qui permettait d'utiliser la puissance disponible en période inoccupée (#3).
- Le budget disponible pour le projet permettait l'installation d'une chaudière électrique, utilisée comme source principale de chauffage, en plus de l'accumulateur, utilisé comme outil de gestion de pointe (#3).

Mis à part le besoin de gérer la demande d'électricité, le contexte de réalisation d'un projet de réfection de chaufferie influence grandement les raisons appuyant le choix de l'ATC. À ce sujet, le participant #5 soutient que dans ses projets, les délais alloués et le budget disponible ne leur permettaient pas de faire une réfection complète du réseau de chauffage existant. L'accumulateur pouvant desservir un réseau de chauffage opéré à moyenne température (65-80°C) permettait de conserver le réseau de distribution et de remplacer uniquement la source de chauffage. L'ampleur des travaux (temps, coûts et superficie touchée) est ainsi considérablement réduite par rapport à une conversion vers un réseau opéré à plus basse température. L'expérience du participant #3 soutient ce point, puisqu'il a aussi travaillé sur plusieurs projets où le réseau de distribution devait être conservé. Il souligne qu'il y a des améliorations énergétiques qui sont relativement simples à implanter sur des réseaux existants et qui méritent d'être

considérées pendant la conception. Il cite en exemple plusieurs projets pour lesquels il a proposé de moduler la température d'opération du réseau en fonction de la température extérieure et de varier le débit, ce qui constituait un net bénéfice énergétique par rapport à un réseau opéré à température (p. ex. 80°C) et débit constants tout l'hiver.

Finalement, les entrevues réalisées avec les concepteurs témoignent que des considérations techniques, bien qu'elles paraissent évidentes, doivent être validées rapidement au début de la conception pour s'assurer de la faisabilité d'installer un ou des ATC. Plusieurs concepteurs interrogés ont rappelé qu'il est important de vérifier que :

- L'espace disponible dans la salle mécanique permet d'installer l'ATC en plus des autres équipements (#2, 5, 7 et 8). Le participant #5 abonde en ce sens : « Dans un bâtiment existant, l'espace disponible est restreint. On retire une chaudière et on doit entrer plusieurs équipements (chaudières, pompes, agrandir l'entrée électrique). Il y a parfois un enjeu d'espace. ». La documentation technique (Steffes, 2020 ; Steffes c, 2020) indique les dégagements recommandés par le manufacturier qui assurent des conditions d'opération adéquates et qui facilitent l'installation et la maintenance.
- La ventilation de la salle mécanique est adéquate (#5, 8). Le manufacturier recommande de maintenir une température ambiante $\leq 29^{\circ}\text{C}$. Le dégagement maximal de chaleur, soit 3 kW et 4,5 kW pour un ATC pleinement chargé de 53 et de 80 kW respectivement, doit être pris en compte (Steffes, 2020).
- La capacité portante du plancher permet de supporter le poids de l'ATC. Ceux-ci pèsent 2118 kg et 3962 kg, pour une unité de 53 et de 80 kW respectivement. Le poids de l'accumulateur peut nécessiter des analyses de structure (#1, 2, 7).
- La tension d'alimentation (le plus souvent 600 V, 3 Φ) et la capacité de l'entrée électrique doivent convenir à l'électrification du chauffage ou d'une portion de celui-ci. Cette considération n'est pas spécifiquement liée à l'installation d'un ATC, mais plutôt à l'électrification du chauffage d'un bâtiment auparavant chauffé au combustible. À cet effet, les participants #3, 5 et 6 ont dû coordonner des travaux électriques imprévus au cours de leurs premières conceptions. Dans les projets suivants, ils se sont assurés que les vérifications nécessaires au niveau de l'alimentation électrique soient faites dès le début du projet. Le participant #8 a relaté un cas spécifique où la faible capacité de l'entrée électrique (208 kW) d'un bâtiment existant était insuffisante pour remplacer une chaudière au mazout par des chaudières électriques et l'ATC a été installé, entre autres, dans le but d'éviter le remplacement de l'entrée électrique. Or, la puissance de base du bâtiment (~30 kW) étant relativement faible par rapport à la puissance modulante de l'ATC (80 kW), des fluctuations de courant sur l'entrée électrique se sont avérées suffisamment élevées pour engendrer des chutes de tension, et ce, malgré les limites imposées à la charge de l'ATC. Le remplacement de l'éclairage existant (des ballasts particulièrement sensibles aux variations de tension) par des luminaires à diode électroluminescente (DEL) a permis de continuer l'usage de l'ATC sans nécessiter le remplacement de l'entrée électrique.

Toutes ces circonstances et considérations techniques relèvent essentiellement de quatre aspects qui sont typiques des projets de conception : (1) la faisabilité technique (p. ex. : espace disponible, possibilité de combiner les entrées électriques, superficie touchée par les travaux), (2) les caractéristiques du bâtiment (p. ex. : inertie thermique, profil des besoins de chauffage et de consommation électrique, nombre d'entrées électriques et leur capacité, réseau de chauffage existant et température d'opération), (3) le budget disponible et le temps alloué pour réaliser les travaux et (4) les exigences du client. Les projets de conception discutés durant les entrevues relèvent donc de contextes, d'objectifs et de circonstances variés ; des combinaisons différentes ont mené à l'installation d'un ATC, ce qui renforce la pertinence de cet équipement pour plusieurs scénarios. Ces quatre aspects constituent la majeure partie des analyses technico-économiques que les participants ont réalisées en conception préliminaire, auxquelles s'ajoute une analyse de rentabilité.

Analyses de rentabilité et impact des programmes de subvention offerts

Dans l'analyse sommaire de rentabilité effectuée par les participants, le coût d'acquisition et d'installation de l'ATC est comparé aux estimations d'économies sur la facturation et les subventions applicables sont déduites. Le coût d'acquisition, variant entre 30 000 et 45 000\$ selon le modèle, les options et l'année d'achat, est un facteur qui limite l'intérêt des professionnels interrogés à proposer l'installation d'ATC à plus de clients. D'une part, certains participants (#6, 8) ont mentionné que le coût d'acquisition d'un ATC avait considérablement augmenté années par rapport au coût de l'électricité et d'autres équipements, ce qui rendait plus difficile de justifier le coût de l'installation.

À titre d'exemple, le participant #1, qui a utilisé l'ATC comme source principale de chauffage, a évalué en 2018 que le coût d'acquisition d'un ATC était 3 fois plus élevé que celui d'une chaudière au propane de capacité nominale équivalente et 1,6 fois plus élevé que celui d'une chaudière électrique. D'autre part, les concepteurs ne semblent pas pouvoir évaluer avec confiance le potentiel de réduction de la puissance électrique qu'il est raisonnable d'atteindre en installant un ATC, contrairement à d'autres équipements de chauffage ou mesures de gestion de la demande avec lesquelles ils ont plus d'expérience et accès à plus de données probantes. Le participant #7, qui a utilisé l'ATC comme outil de gestion de pointe, mentionne que l'installation d'ATC est fréquemment rejetée dans des projets avec EEG en faveur d'autres mesures de gestion de la demande moins coûteuses, moins complexes à mettre en place et pour lesquelles les économies potentielles pouvaient être évaluées avec plus d'assurance. Les données sur la performance énergétique d'ATC installés dans des contextes similaires à ceux du présent rapport pourraient contribuer en ce sens. De même, une estimation raisonnable des coûts de maintenance pourra dorénavant être ajoutée à l'analyse de rentabilité à partir des données présentées à la Section 3.2.2.

Recommandation 3 :

Qu'un outil simplifié soit développé et rendu disponible aux concepteurs afin de leur permettre de quantifier le potentiel d'un accumulateur à réduire la puissance appelée et la facturation énergétique d'un bâtiment, au moment de la conception préliminaire.

En regard des subventions, les concepteurs interrogés œuvrant au sein d'ESE (#6 et 7) ont l'habitude de participer aux programmes des distributeurs d'énergie et du MESS, lorsque le projet est réalisé pour un CSS, pour finaliser le montage financier de leurs projets. Le participant #4, qui a réalisé des projets d'installation d'ATC en mode traditionnel, a lui aussi participé à un programme du MESS qui offrait des incitatifs financiers pour des projets de réduction des émissions de GES. D'après les entrevues complétées avec ces trois concepteurs (#4, 6 et 7), ils considèrent les subventions comme des bonus, c'est-à-dire qu'ils n'orientent pas leurs choix de conception en fonction des subventions offertes. Le participant #1 est du même avis : dans son projet, il n'a pas participé à un programme de subvention puisqu'il jugeait que les incitatifs n'étaient pas significatifs par rapport au coût total du projet. Rappelons que dans ce cas, le projet comprenait l'agrandissement d'un bâtiment et la réfection de la chaufferie existante, donc le coût total du projet était majoritairement dominé par les coûts des travaux de construction, des matériaux et de main-d'œuvre liés à l'agrandissement. Les autres participants interrogés (#2, 3, 5 et 8) n'ont pas recouru à des programmes de subvention dans leurs projets d'installation d'ATC, soit parce que cela ne s'inscrivait pas dans leur mandat (#2) ou que le projet n'était éligible à aucun programme au moment de sa réalisation (#3). Les participants #5 et 8 n'ont pas fourni d'explications additionnelles.

Nonobstant ce faible recours aux programmes de subvention, certains participants recommandent de les promouvoir puisque cela suscite de l'intérêt pour la technologie de la part des clients et des professionnels : « Juste de dire qu'il y a une subvention, ça ouvre les yeux même si le montant n'est pas si important. Ce n'est pas nécessairement tous les projets qui vont comprendre des accumulateurs, mais ça met la puce à l'oreille. » (#5). Les quelques programmes de financement pertinents seront présentés à la Section 5.3.

Recommandation 4 :

Que les programmes de subvention disponibles pour l'implantation d'un accumulateur soient activement publicisés auprès des firmes de génie-conseil, des ESE et des gestionnaires de bâtiments institutionnels.

3.3.2 Conception détaillée

Pour les concepteurs, l'objectif de la conception détaillée est principalement de déterminer le nombre d'accumulateurs à installer, leur capacité (53 ou 80 kW), la nouvelle configuration de la salle mécanique et la séquence de contrôle à spécifier sur les plans et devis. Comme présenté dans le Tableau 7, les concepteurs interrogés prévoyaient utiliser l'ATC soit comme équipement de **gestion de pointe** électrique ou comme **source principale** de chauffage. D'après les entrevues complétées, la seconde utilisation demande une plus grande attention de la part des concepteurs puisqu'ils doivent s'assurer que l'énergie pouvant être stockée durant les moments de charge suffira

à assurer une puissance de décharge permettant de desservir les besoins thermiques du bâtiment. Les exigences de redondance des équipements de chauffage et la possibilité d'utiliser du combustible comme source d'appoint influencent aussi la profondeur des analyses effectuées. Le contexte de réalisation du projet dicte les informations disponibles lors de la conception détaillée.

Dans les bâtiments où il est prévu d'utiliser l'ATC comme outil de **gestion de pointe**, les concepteurs considèrent d'abord l'espace disponible dans la salle mécanique et le budget, pour fixer une limite supérieure sur le nombre d'ATC. Ils jugent ensuite du nombre et de la capacité des ATC (53 ou 80 kW) à installer selon la possibilité de les charger en période hors pointe, déterminée par l'écart entre l'appel maximal de puissance journalier et la puissance appelée en période hors pointe. Pour ce faire, ils doivent établir un profil de puissance électrique appelée, généralement sur une base horaire, pour une période hivernale donnée. Dans les bâtiments existants, le profil de puissance appelée est établi à partir des factures d'électricité mensuelles qui ne donnent que la puissance maximale mensuelle et l'énergie consommée. L'énergie doit donc être redistribuée sur une base horaire selon des données de température extérieure et l'horaire d'occupation du bâtiment. Le facteur d'utilisation apparaissant sur les factures mensuelles d'électricité sert parfois d'indicateur pour confirmer si la redistribution de la consommation d'électricité a bien été effectuée. Lors de l'électrification d'une chaufferie, les factures de combustible doivent également être exploitées, car les besoins thermiques desservis se grefferont au profil horaire d'appel électrique. Le gain d'efficacité énergétique dû au remplacement d'équipements est aussi considéré dans ces calculs. Dans les projets de nouvelles constructions ou de transformations majeures, ce profil horaire d'appel de puissance peut être extrait d'un logiciel de simulation énergétique. Ainsi, les concepteurs peuvent se faire une idée approximative de l'impact qu'aurait l'installation d'ATC sur le profil de puissance et sur la facturation d'électricité. Or dans plusieurs cas, les concepteurs rapportent que les principaux facteurs décisionnels dictant le choix final du nombre d'ATC sont l'espace disponible dans la salle mécanique et le coût d'acquisition. Certains d'entre eux soulignent que la conception est relativement simpliste puisqu'il n'y a qu'un équipement de ce type de disponible sur le marché et que seuls deux modèles sont offerts (capacité de 53 et 80 kW). Ils ajoutent que les deux modèles occupent la même superficie au sol et que le coût du modèle de 53 kW est plus élevé que celui de 80 kW, lorsque son coût est normalisé par rapport à la capacité nominale et la quantité d'énergie pouvant être stockée (290 et 440 kWh). Le participant #5 a mentionné qu'en considérant cela, il spécifie toujours des unités de 80 kW. Bien que la conception soit jugée simple pour une utilisation comme outil de gestion de pointe, il n'en demeure pas moins que la performance repose sur la séquence de contrôle et l'optimisation de celle-ci, ce qui sera abordé plus loin dans cette section.

Lorsqu'ils prévoient utiliser l'ATC comme **source principale** de chauffage, les concepteurs doivent s'assurer de combler les besoins thermiques du bâtiment en tout temps. Ils font des analyses similaires à celles mentionnées précédemment qui portent sur le profil de puissance électrique et la gestion de pointe. À celles-ci s'ajoute la nécessité de déterminer un profil horaire des besoins thermiques (c.-à-d. la puissance de chauffage requise) qui est établi avec des méthodes analogues à celles utilisées pour le profil de puissance électrique. Les participants affirment concentrer leur analyse des besoins thermiques sur une période critique, typiquement 2 ou 3 jours de froid consécutifs, pour évaluer la quantité d'énergie que les ATC doivent accumuler et la puissance de chauffage qu'ils doivent fournir. Le profil de puissance électrique sert alors à évaluer la puissance disponible pour la charge des ATC. Cette méthode n'est évidemment pas parfaite, surtout dans le cas des bâtiments existants pour lesquels le profil horaire des besoins thermiques est établi à partir de factures, au mieux mensuelles pour l'électricité, et de moindre fréquence pour le combustible. Les concepteurs évoquent eux-mêmes que l'incertitude sur le profil des besoins thermiques est relativement grande.

Il est parfois possible d'avoir davantage d'information sur le profil de besoins de chauffage du bâtiment en analysant des données d'opération des équipements existants, lorsque le bâtiment est équipé d'un BMS permettant d'enregistrer ces données. C'est notamment ce qu'a fait le participant #2 en utilisant les données aux 15 minutes de l'état (marche/arrêt) du brûleur de la chaudière existante pour estimer le profil horaire de puissance fournie par la chaudière au combustible. Ces calculs, effectués sur une période de quelques heures pour estimer la pointe des besoins par grand froid, lui ont permis de juger à quel point la chaudière aux combustibles existante était surdimensionnée et confirmer qu'un ATC de 80 kW convenait comme source principale de chauffage. Cette conclusion est supportée par l'analyse des données d'opération de ce site (Section 5.4, site #1), une fois la période de rodage des séquences de contrôle terminée.

Or, une étude plus approfondie des besoins thermiques du bâtiment aurait été possible avec ces données mesurées et pourrait avoir mené à une réduction de la période de rodage de la séquence de contrôle. En effet, ce qui a été difficile pour les opérateurs du site #1 fut de comprendre que l'abaissement de température du réseau de chauffage qui était fait en période inoccupée ne pouvait être conservé tel quel, suite à l'implantation de l'ATC. L'ATC à lui seul ne suffisait pas à compenser rapidement une différence de température élevée au début de la période occupée, tout en conservant suffisamment d'énergie stockée pour le reste de la journée. Les opérateurs ont eu besoin de la période de rodage pour modifier la séquence d'opération du réseau de chauffage, optimiser l'utilisation de l'énergie stockée dans l'ATC et minimiser le recours à la source de chauffage auxiliaire. Cette expérience rappelle la nécessité de dimensionner tout système de stockage utilisé comme source principale de chauffage sur la base de l'énergie requise sur la durée de la période de décharge anticipée et non seulement sur la base de la puissance maximale appelée (voir la Section 1.1.2). Ainsi, il aurait été avantageux d'exploiter les données d'opération du réseau de chauffage existant pour quantifier le profil horaire des besoins de chauffage sur une période plus longue, dans l'optique de préciser la séquence de contrôle au moment de la conception et ainsi réduire la durée de la période de rodage.

Bien que la possibilité de recourir à du mesurage n'a pas été discutée lors des entrevues avec les concepteurs, ces données permettraient aux concepteurs d'évaluer avec plus de confiance le profil horaire des besoins thermiques. Lorsqu'un projet de réfection de chaufferie est prévu, l'enregistrement de données sous-horaires typiquement affichées au BMS devrait être prévu afin de faciliter et même réduire significativement la période de rodage. Lorsqu'il n'est pas possible de recourir à des données d'opération existantes via le BMS, l'installation d'appareils de mesure temporaires sur le réseau de chauffage devrait être considérée.

Bonne pratique 11 :

Que les concepteurs exploitent, lorsque possible, l'historique de données du BMS afin de mieux comprendre l'opération du réseau de chauffage existant et d'évaluer avec plus de précision la puissance de chauffage requise et l'énergie à accumuler.

Bonne pratique 12 :

Que les gestionnaires et opérateurs de bâtiments prévoient l'ajout de mesurage sur les réseaux de chauffage existants (débit et température) pour lesquels ils planifient une réfection de la chaufferie afin de mieux outiller les concepteurs.

En combinant l'analyse des besoins thermiques et du profil de puissance électrique, les concepteurs déterminent le nombre d'ATC requis et leur capacité pour une utilisation comme **source principale** de chauffage. Des concepteurs ont néanmoins souligné la grande incertitude associée à ces calculs, particulièrement lors d'une première expérience. Le participant #2 semblait inconfortable, malgré les validations qu'il a faites et qui ont été discutées précédemment, et a exprimé ses appréhensions ainsi : « Moi j'avais confiance en la technologie [les ATC]. [...] Le gros stress [pour moi] c'était de savoir si on allait avoir assez d'énergie accumulée pour passer une journée froide. Le principe [d'accumuler de l'énergie en période hors pointe] est bon, mais j'aurais pu avoir du trouble vu que c'est un gros risque pour moi. Demain matin, s'ils laissent une fenêtre ouverte à l'école, je suis dans le trouble pareil, s'il n'y a pas assez de chauffage. [Ce serait la même chose] si l'accumulateur, pour une raison ou une autre, n'arrive pas à accumuler [suffisamment] durant la nuit. » D'après ces propos et en considérant les données qui étaient disponibles lors de la conception, cette incertitude semble venir au moins en partie d'un manque de données sur l'opération de l'ATC, spécifiquement la puissance thermique qui peut être fournie pour divers niveaux d'énergie stockée, mais aussi d'une incertitude sur la capacité ou le besoin de recharger l'ATC pendant la période occupée du bâtiment. Les concepteurs anticipent en effet que les ATC utilisés comme source principale de chauffage devront être rechargés au moins partiellement pendant la période occupée, ce qui ajoute encore plus d'importance à la précision des profils de puissance électrique appelée et de besoins thermiques.

Certains concepteurs impliqués dans la phase d'opération ont constaté que le délai entre le moment où un ATC avec un faible niveau d'énergie stockée commence à être rechargé et le moment où une puissance thermique appréciable peut être fournie est plus long que ce qu'ils anticipaient. Il n'y a actuellement pas de données disponibles dans la

littérature ou dans la documentation du manufacturier qui auraient permis de les renseigner à cet effet avant d'acquérir eux-mêmes une expérience d'opération avec la technologie. Des courbes de performance de l'ATC permettaient de pallier cette lacune, d'autant plus que la plupart des concepteurs interrogés ne sont pas amenés à s'impliquer en opération dans le cadre de leurs mandats. Ils ne peuvent donc pas acquérir une expérience d'opération qui leur permettrait de modifier leurs pratiques de conception, d'où l'intérêt d'avoir les informations nécessaires au moment de la conception.

Recommandation 5 :

Que des courbes de performance, indiquant la puissance de décharge disponible selon le niveau d'énergie stockée et la durée de la décharge, soient rendues accessibles aux concepteurs.

Dû à leur incertitude vis-à-vis de leurs calculs, plus spécifiquement pour les bâtiments existants, les concepteurs interrogés vont parfois prévoir installer un ATC supplémentaire (#6) ou une chaudière d'appoint au combustible (#1, 2, 6 et 8). Les résultats de la Section 5.4 montrent que dans certains cas, cette pratique mène à une contribution énergétique marginale d'un des équipements installés. Par exemple, les résultats du site #5 montrent que l'ATC #1 fournit environ 100 000 kWh (82%) d'énergie thermique de plus que l'ATC #2 ; que l'énergie fournie par la chaudière au propane utilisée comme source auxiliaire est faible (environ 6 050 kWh⁷, soit moins de 4% de l'énergie fournie par tous les équipements) et que ce site respecte le critère d'Exemplarité de l'État. Cette pratique peut toutefois s'avérer utile pour sécuriser les opérateurs, ou même être nécessaire pour assurer que les besoins soient desservis pendant la période de rodage de la séquence de contrôle, dû aux incertitudes actuelles au moment de la conception.

Séquence de contrôle

En regard de la commande-contrôle de l'ATC, le rôle des concepteurs quant au développement et à l'optimisation de la séquence varie. Les concepteurs ayant participé à des projets de type traditionnelle (#1 à 5) développent une séquence de contrôle et l'intègrent dans leurs plans et devis. L'implantation de cette séquence revient à une firme en contrôle. Durant la première année d'opération, les concepteurs (#3 à 5) font un suivi avec les opérateurs afin de vérifier que tous les équipements fonctionnent et interagissent entre eux comme prévu. Les autres concepteurs ayant réalisé ce type de projet (#1 et 2) n'ont soit pas fait mention d'un tel suivi après la mise en service, ni de qui en était chargé (#1) ; ou alors ont indiqué que cela ne faisait pas partie de leur mandat (#2). Le participant #2 avait spécifié au devis que la firme en contrôle devait effectuer ce suivi, ce qui apparaît être une pratique nécessaire dans cette situation, mais qui ne lui donne pas de rétroaction permettant d'améliorer la séquence de contrôle d'un futur projet. D'après les entrevues complétées (#3 à 5), ce suivi apparaît être effectué à relativement haut niveau et ne semble pas porter sur l'optimisation des séquences. Ce suivi n'est pas non plus spécifiquement dédié à l'optimisation de la séquence de contrôle de l'ATC, qui s'étend généralement au-delà de la première année d'opération d'après les expériences rapportées dans la Section 3.2.1. Cette mise en service étendue de l'ATC ne s'inscrit donc pas dans le mandat donné aux professionnels réalisant des projets de type traditionnel, ce qui peut contribuer aux difficultés rencontrées par les opérateurs, surtout lors de leur première expérience avec la technologie.

La nature des projets de type EEG fait en sorte que les professionnels œuvrant pour des ESE (#6 et 7) sont davantage impliqués dans le suivi d'opération des ATC durant les premières années. Conséquemment, ils ne mettent pas l'emphase sur le choix optimum de la séquence lors de la conception, mais ils se fient plutôt sur la période de rodage pour faire des ajustements. Cette pratique peut toutefois engendrer des imprévus lors d'une première expérience. Le participant #6 l'a vécu lors de sa première utilisation d'ATC comme source principale de chauffage dans un bâtiment existant. La séquence initialement implantée a dû être ajustée à plusieurs reprises durant la première saison de chauffage, réduisant l'énergie fournie par les ATC en deçà de ce qui avait été prévu. Comme « la conception avait été faite relativement serrée » (#6) pour maximiser la rentabilité du projet et que les besoins de chauffage ne pouvaient être entièrement comblés, une chaudière d'appoint au combustible a été installée comme mesure corrective pendant le rodage. Maintenant que la séquence de contrôle a été ajustée, les factures de ce site montrent une utilisation pratiquement nulle de combustible. Cette expérience témoigne de l'importance d'établir une séquence la plus complète possible afin de réduire la durée de la période de rodage.

⁷ Estimation basée sur les émissions totales de GES de ce site de 2 t. de CO₂eq, desquelles 0,5 t. ont été soustraites puisqu'elles sont attribuables à l'électricité consommée et auxquelles le facteur d'émission de 0,2054 kgCO₂eq/kWh et un rendement saisonnier de 83% ont été appliqués.

Ce qui impacte actuellement le déroulement de la période de rodage est principalement l'ajustement de la courbe d'énergie ciblée en fonction de la température extérieure ; une action qui peut s'étendre tout au long de la première saison d'opération et qui a un impact sur la performance de l'équipement pendant cette période. Il faut rappeler que la capacité de décharge de l'ATC pour divers niveaux d'énergie stockés (c.-à-d. de températures de briques) ne sont pas disponibles dans la documentation du fabricant, ni dans la littérature. Les seules courbes de décharge disponibles supposent que l'ATC est pleinement chargé (760°C), alors qu'il n'est pas recommandé que la séquence force l'ATC à maintenir les briques à haute température (>700°C) pendant des périodes prolongées au vu des enjeux d'O&M et des pertes thermiques que cela peut engendrer (voir Section 3.2). Certains concepteurs interrogés admettent que la courbe d'énergie ciblée en fonction de la température extérieure a été établie de manière quelque peu arbitraire et qu'elle est réutilisée dans plusieurs projets sans ajustements pour un bâtiment ou une utilisation spécifique. Conséquemment, il faudra en prévoir l'ajustement pendant la période de rodage. Un autre paramètre important à ajuster est le point de consigne de délestage de puissance électrique qui permet de calculer la puissance disponible pour la charge de l'ATC.

Pour le déploiement futur de la technologie, il serait recommandé qu'un outil de modélisation simplifié soit développé et rendu accessible aux concepteurs, leur permettant de mieux envisager la performance attendue de l'équipement, soit comme outil de gestion de pointe ou comme source principale de chauffage. Un tel outil devrait permettre certaines intégrations de plus en plus recherchées dans les nouvelles constructions et les transformations majeures telles que la combinaison à de la géothermie ou de l'aérothermie (c.-à-d. pour traverser les périodes de grand froid où la performance des thermopompes chute drastiquement).

Recommandation 6 :

Qu'un outil de modélisation simplifié de l'ATC soit développé pour aider les concepteurs à mieux établir la courbe d'énergie ciblée et le point de consigne de délestage dès la conception détaillée, afin de réduire la durée de la période de rodage de la séquence de contrôle.

Dans l'ensemble, les concepteurs s'entendent sur le fait qu'il est important de transmettre clairement aux opérateurs leur intention derrière la conception. Ceux-ci voient en quelque sorte l'installation d'ATC comme un ajout de flexibilité au bâtiment. Or, ils doivent s'assurer que c'est ce que le client recherche et que celui-ci accepte que cela sous-entende de réviser la séquence de contrôle durant les premières années d'opération. À ce titre, il serait une bonne pratique d'indiquer clairement à l'opérateur l'utilisation prévue de l'ATC, de souligner quels paramètres de la séquence devraient être ajustés au fil des saisons (p. ex. : courbe d'énergie ciblée en fonction de la température extérieure, point de consigne de délestage de puissance électrique) et lesquels ne doivent pas être modifiés (p. ex. : température maximale des briques). Basé sur les expériences d'O&M rapportées dans la Section 3.2, les concepteurs devraient indiquer plus clairement à leurs clients l'importance de faire cette optimisation de la séquence de contrôle ou de mandater des professionnels ayant une expertise en contrôle d'ATC pour le faire.

Bonne pratique 13 :

Que les concepteurs transmettent clairement leur intention derrière la conception (l'utilisation prévue de l'ATC, les paramètres de la stratégie de contrôle à ajuster au fil des saisons d'opération et ceux à ne pas modifier, ainsi que l'importance d'optimiser la séquence de contrôle) aux opérateurs via la documentation du projet.

Finalement, certains concepteurs soulignent qu'une meilleure exploitation des données fournies par l'ATC au niveau du BMS pourrait faciliter le travail des opérateurs. Le participant 5 indique que : « Les gestionnaires de parcs immobiliers ont tellement de systèmes à gérer et de plus en plus complexes, il faut rendre ça simple [leur opération]. Quelqu'un qui ne reçoit pas un message d'alarme [p. ex. de défaillance d'élément chauffant ou du moteur de ventilateur], il ne se rendra pas compte tout de suite du problème et ne pourra pas le corriger, et il y a plusieurs éléments électriques dans ça [un accumulateur]. » Ce constat est cohérent avec les bonnes pratiques qui émanent des entrevues complétées avec des opérateurs (Bonne pratique 6 et Recommandation 2).

Par exemple :

- Prévoir l'ajout de mesurage de la puissance électrique appelée par l'accumulateur et son affichage sur le BMS.
- Prévoir l'acquisition du nombre d'éléments actifs dans chaque noyau (L147 à L149) et de la température moyenne de chaque noyau (L137 à L139).
- Exploiter ces données pour effectuer un calcul de la puissance électrique appelée de l'accumulateur et le comparer à la valeur mesurée. Une telle comparaison permet un diagnostic automatisé et en continu du nombre d'éléments chauffants défaillants.

Bonne pratique 14 :

Que les concepteurs spécifient aux plans et devis l'utilisation des extrants de l'ATC et l'instrumentation externe nécessaire pour détecter et diagnostiquer les défaillances et/ou bris de composants et en avertir les opérateurs via l'interface du BMS.

Chapitre 4 – Description des sites de l'étude détaillée

4.1 Configuration des réseaux de chauffage

Bien que l'installation des accumulateurs thermiques centraux (ATC) a le plus souvent été faite durant une rénovation complète de la chaufferie des sites étudiés, la configuration finale des réseaux de chauffage résultants est variable. Le Tableau 8 présente les appareils de chauffage installés sur chacun des sites, les sources énergétiques utilisées ainsi que la source principale pendant la période d'analyse. Les degrés-jours de chauffage (DJ_c) indiqués furent établis avec une base de 18°C, pour une année normale, pour une station météo située à proximité et sont tirés de la base de données Hélios. La colonne « Exemplarité de l'État » indique si le critère sur la consommation totale annuelle de combustible est satisfait, soit un maximum de 15% de l'énergie totale consommée annuellement, tel que spécifié dans le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2020) qui était en vigueur lorsque les ATC ont été installés. Le tarif d'électricité d'Hydro-Québec en vigueur pendant la période d'analyse est indiqué dans la dernière colonne du tableau avec le nombre de compteurs associés à ce tarif entre parenthèses. Les réseaux de chauffage y sont catégorisés en fonction des sources d'énergie présentes et identifiées par les acronymes suivants :

- ATC : un ou plusieurs accumulateurs thermiques centraux sont présents.
- ChElec : une ou plusieurs chaudières électriques sont présentes.
- Combustible : une ou plusieurs chaudières au combustible (propane, mazout, gaz naturel) sont présentes.
- Aux. Combustible : indique si le combustible est utilisé comme une source auxiliaire de chauffage et représente moins de 5% de la consommation totale annuelle d'énergie.

Le Tableau 8 répertorie 6 combinaisons différentes qui décrivent les équipements en place (ATC, chaudière), les sources d'énergie présentes (électricité, combustible : propane, gaz naturel, mazout) et celles utilisées uniquement comme source auxiliaire (Aux.). Une description de la configuration du réseau de chauffage de chaque site est présentée dans les fiches synthèses en annexe.

Les sites #1 à 7 font partie du même CSS. L'installation d'accumulateurs sur les sites #2 à 5 fut réalisée à travers un même large projet de rénovation avec contrat d'économie d'énergie garantie, effectué avec une entreprise de services écoénergétiques (ESE). L'installation sur les sites #1, 6 et 7 fut réalisée en mode traditionnel et la solution conçue par une firme de génie différente sur chaque site. L'expérience favorable des gestionnaires avec les installations effectuées en contrat d'économie d'énergie garantie en plus de 3 installations ultérieures datant de 2011 et 2013, les a encouragés à préconiser l'utilisation des accumulateurs comme source de chauffage pour d'autres projets similaires. Pour deux sites (#2 et 6), l'accumulateur est la seule source de chauffage installée. Les sites #1, 3, 4 et 7 sont catégorisés par « ATC + Aux. Combustible » puisque les factures d'énergie et les données d'opération de l'hiver 2020-21 montrent que la consommation de propane est inférieure à 6% de la consommation totale annuelle d'énergie. Cette source d'énergie n'est utilisée que pour de courts moments pendant l'hiver et les sites satisfont donc le critère d'Exemplarité de l'État. Pour 6 de ces sites (#1 à 4, 6 et 7), les accumulateurs desservent tant les charges de chauffage périphérique (Rad) que du chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (OA). La superficie de ces bâtiments est petite par rapport aux sites #9 à 12, mais comparable à celle des sites #13 à 18. Il faut toutefois noter que les sites #1 à 4, 6 et 7 subissent des conditions hivernales parmi les moins rigoureuses de l'échantillon (4 133 DJ_c), donc plus clémentes que celles des sites #13 à 18 (entre 4 342 DJ_c et 5 321 DJ_c).

Le site #5 fait partie du même CSS que les précédents. Malgré que sa taille et que les conditions hivernales y soient similaires, une chaudière électrique y fut toutefois installée en plus des ATC et d'une chaudière au propane comme source d'énergie auxiliaire. Bien que l'installation d'un accumulateur sur ce site ait eu lieu en 2015, soit avant les autres installations listées plus haut, le CSS avait déjà vécu une expérience de la technologie par d'autres installations : 2 ATC installés en 2011 et 1 en 2013. Or, celles-ci avaient été faites sur des constructions neuves. Le CSS en était donc à sa première expérience avec le site #5 en installant un accumulateur lors de la rénovation de la chaufferie d'un bâtiment âgé (const. 1971). L'usage de l'électricité pour le chauffage du site #5 est dominant par rapport au combustible, mais il n'y a pas de dominance marquée entre les accumulateurs et la chaudière électrique. Les sites #12 à #16 sont dotés d'une configuration similaire permettant une alimentation 100% électrique, mais sans source d'énergie auxiliaire. Bien que ceux-ci sont de taille similaire aux sites alimentés presque exclusivement par des ATC, la rigueur de leurs hivers est parmi les plus prononcées de l'échantillon (4 966 DJ_c et 4 342 DJ_c).

respectivement pour les sites #12 à 14 et #15-16). L'analyse des données de performance a permis de conclure que la flexibilité amenée par la chaudière électrique supplémentaire n'est pas avantageuse au niveau du rendement des ATC (voir le Chapitre 5). Autre fait important, ces sites comportent tous plusieurs compteurs. Bien que la présence d'un second compteur soit une relique habituelle d'une transition de la biénergie vers l'alimentation 100% électrique, le maintien des deux compteurs aura un impact non négligeable sur la facturation électrique de ceux-ci.

Les sites #9 à 11 sont ceux de l'échantillon qui occupent les plus grandes superficies et ils sont significativement plus grands que les sites qui utilisent l'ATC comme source principale de chauffage. De plus, les sites #10 et 11 sont assujettis à des hivers rigoureux (4 533 DJ_c) et leurs boucles de chauffage desservent du chauffage ou préchauffage de l'air extérieur, en plus des charges périphériques, ce qui augmente leurs besoins thermiques. Pour les sites #9 et 10, l'électricité est dominante, alors que le combustible est dominant pour le site #11. De par leurs grandes superficies et en ayant un seul compteur d'électricité, les pointes de puissance de ces sites sont importantes et leur abonnement au tarif M encourage fortement la gestion des pointes, aux dépens de coûts d'appels de puissance élevés (14,778 \$/kW) (HQ a, 2021). Les factures de gaz naturel des sites #9 et 11 montrent que le critère d'Exemplarité de l'État n'est pas satisfait pendant la période d'analyse.

Les sites #17 et 18 ont de petites superficies et sont situés dans une région froide (5 321 DJ_c) par rapport aux autres sites de l'échantillon. Le réseau de chauffage y est utilisé pour du chauffage périphérique uniquement, ce qui devrait réduire les besoins thermiques par rapport aux sites ayant une superficie et un climat comparables, mais qui ont un usage « OA » (sites #5 et 6). Pourtant, l'ATC ne se positionne pas comme source principale pour le site #17. Il est important de mentionner que ce sont les deux seuls sites de l'échantillon avec des ATC de puissance nominale de 53 kW ; les autres ayant des unités de 80 kW. Cette faible participation de l'ATC pourrait s'expliquer par le fait que l'énergie pouvant être stockée et la capacité de décharge des unités de 53 kW sont moindres que celles de 80 kW utilisés ailleurs.

Le Tableau 8 montre que l'électricité est la source d'énergie dominante de chauffage pour la plupart des sites, que ce soit par l'utilisation des accumulateurs ou bien de chaudières électriques. Même les sites #9 et 10 qui n'ont pas une transition énergétique 100% complète, c'est-à-dire qui utilisent encore du combustible, utilisent en priorité l'électricité. Ce constat est cohérent avec l'exigence d'Exemplarité de l'État qui requiert que l'énergie renouvelable soit priorisée (>85%). Ce n'est toutefois pas le cas des sites #11 et 17 dont les factures indiquent des consommations de combustible supérieures à celle de l'électricité utilisée pour le chauffage. Les causes de cet usage prépondérant des combustibles seront étudiées en détail lors de la présentation des résultats de l'analyse de performance des sites.

Tableau 8: Configuration des réseaux de chauffage et source principale

No. CSS	No. site	Superficie (m ²)	DJ _c	Usage ¹	Sources de chauffage	Source principale	Exemplarité de l'État	Compteurs et tarifs
1	1	1 438	4 133	Rad	ATC + Aux. Combustible	Élec.	Oui	G(1)
	2	901	4 133	Rad	ATC	Élec.	Oui	G(1)
	3	4 201	4 133	Rad	ATC + Aux. Combustible	Élec.	Oui	M(2)
	4	4 402	4 133	OA+Rad	ATC + Aux. Combustible	Élec.	Oui	M(2)
	5	3 904	4 133	OA+Rad	ATC + ChElec + Aux. Combustible	Élec.	Oui	G(1) ; M(1)
	6	3 600	4 133	OA+Rad	ATC	Élec.	Oui	M(1)
	7	1 633	4 133	Rad	ATC + Aux. Combustible ²	Élec.	Oui	M(1)
2	8	24 074	3 931	ECD	ATC + Combustible	n.d.	n.d.	G(1) ; M(1)
	9	7 742	3 931	Rad	ATC + ChElec + Combustible	Élec.	Non	M(1)
3	10	34 262	4 533	OA+Rad+ECD	ATC + ChElec + Combustible	Élec.	Oui	M(1)
	11	18 628	4 533	OA+Rad	ATC + ChElec + Combustible	Combustible	Non	M(1)
4	12	5 786	4 966	Rad	ATC + ChElec	Élec.	Oui	G9(1) ; M(1)
	13	4 413	4 966	OA+Rad	ATC + ChElec	Élec.	Oui	G9(1) ; M(1)
	14	3 303	4 966	Rad	ATC + ChElec	Élec.	Oui	G9(4)
5	15	2 822	4 342	Rad	ATC + ChElec	Élec.	Oui	G(1) ; M(1)
	16	3 704	4 342	Rad	ATC + ChElec	Élec.	Oui	G(1) ; M(1)
6	17	2 356	5 321	Rad	ATC + Combustible	Combustible	Non	G(2) ;
	18	2 242	5 321	Rad	ATC + Combustible	Élec.	Non	M(1)

¹ L'usage spécifie les besoins thermiques desservis par l'accumulateur, soit le chauffage des espaces par des appareils hydroniques tels des radiateurs, « Rad », le chauffage ou préchauffage de l'air extérieur, « OA », ou le chauffage de l'eau chaude domestique, « ECD ».

² Ce site comprend une 2^e boucle de chauffage alimentée par la géothermie. La 1^{re} boucle alimentée par l'ATC peut, via un échangeur, servir d'appoint à la 2^e boucle. Le recours à cet appoint n'ayant pu être quantifié, les deux boucles sont ici traitées comme distinctes et l'usage de l'accumulateur n'est pas modifié. Cette configuration a été répertoriée dans d'autres bâtiments de l'inventaire, mais n'est pas incluse dans la présente étude.

4.2 Contrôle des accumulateurs

Le principe de gestion de l'énergie des bâtiments consiste à répartir la consommation d'électricité dans le temps. Différentes techniques peuvent être utilisées, mais seulement quatre sont pertinentes pour les bâtiments institutionnels considérés, soient :

- Déplacer des charges de la période de pointe vers la période hors pointe (en anglais *peak shifting*) sans réduire significativement l'ampleur de la pointe.
- Écrêter les pointes en effaçant des charges du réseau électrique durant les périodes de pointe (en anglais *peak shaving*). Ce principe s'applique tant au délestage (c.-à-d. éteindre des charges) fait par les participants à un programme de puissance interruptible, qu'à l'activation d'une autre source d'énergie pour desservir des besoins existants telle que l'usage de chaudières biénergie.
- Activer des charges permettant de combler les creux de demande (en anglais *valley filling*).
- Nivelier les charges (en anglais *load levelling*). C'est essentiellement la combinaison des deux dernières techniques (écrêtage en période de pointe et remplissage des creux en période hors pointe) afin de stabiliser la puissance appelée du bâtiment vers une valeur constante.

Comme rapporté par les participants aux entrevues du volet approvisionnement (voir la section 3.1.1), la motivation à mettre en place une stratégie de gestion de l'énergie provient souvent d'incitatifs financiers comme la facturation des pointes appelées (ex. tarifs M, L et LG) ou la mise en place de crédits associées aux réductions de puissance appelée en période de pointe (ex. tarif Flex G, option d'électricité interruptible, option de gestion de la demande de puissance). Dans le cas de certains petits bâtiments, le désir de maintenir un abonnement au tarif G, ne facturant pas l'appel de puissance, après une conversion de leur système de chauffage des combustibles vers les énergies renouvelables dictait le besoin de limiter la puissance maximale mensuelle appelée par le bâtiment. Typiquement, un accumulateur thermique central (ATC) permet d'utiliser le premier et le dernier de ces mécanismes ; utilisant l'électricité en période hors pointe pour réchauffer les briques de l'unité et en redistribuant la chaleur au réseau du bâtiment durant les périodes de haute demande.

La stratégie mise de l'avant pour chaque site est présentée sur la fiche synthèse du site en annexe. Le contrôle-commande d'un accumulateur peut se résumer en 4 composants :

1. Limiter les moments où l'appareil est autorisé à se recharger sur le réseau électrique ;
2. Contrôler l'ampleur de la puissance appelée par celui-ci ;
3. Limiter les moments où l'appareil est autorisé à décharger sa chaleur dans le réseau de chauffage du bâtiment ;
4. Fixer le niveau d'énergie ciblé pour l'appareil en assignant une température de consigne pour les briques.

Bien que les stratégies varient largement entre les sites étudiés, l'ensemble des gestionnaires, opérateurs et concepteurs consultés n'ont rapporté qu'un seul objectif pour les stratégies mises en place soit de réduire l'ampleur de la pointe électrique facturable. À ce sujet, il appert d'apporter une nuance importante sur le concept de « pointe ».

Pour un bâtiment, une période de pointe réfère aux moments où la puissance appelée du bâtiment (ou d'une partie des charges d'un bâtiment lié à un même compteur) devient nettement plus prononcée que sa puissance appelée moyenne. Dans le cas de bâtiments scolaires, ces périodes de pointes ont typiquement lieu durant les heures d'occupation (en jour, de semaine) due à la confluence des besoins de chauffage des locaux et de chauffage de l'air ventilé provenant de l'extérieur. Dans le cas de bâtiments non ventilés, la période de pointes sera plus fortement corrélée aux périodes de grands froids hivernaux et pourrait avoir lieu plus tôt en matinée, avant l'arrivée des occupants.

Pour Hydro-Québec, une pointe réfère au moment où la demande d'électricité sur le réseau atteint son maximum annuel ou journalier. Au Québec, la pointe annuelle se produit en hiver en raison des besoins de chauffage concomitant des bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels. Les pointes quotidiennes se produisent en semaine, le matin entre 6 h et 9 h et en fin de journée entre 16 h et 20 h, aux moments où la transition des employés entre leurs lieux de travail et de résidences entraîne une consommation importante tant des bâtiments résidentiels que commerciaux et institutionnels. Conséquemment, la pointe journalière d'un bâtiment scolaire ventilé se produit

traditionnellement durant les périodes de pointes du réseau électrique alors que celle d'un bâtiment non ventilé serait susceptible de se produire plus tôt. Un histogramme des fréquences horaires de la pointe journalière de puissance appelée de chaque site pour la période hivernale 2020-2021 est présenté dans les fiches synthèses en annexe.

Conséquemment, les stratégies mises en place seront évaluées selon leur potentiel à :

- Réduire l'ampleur de la pointe électrique du bâtiment en répartissant les besoins de chauffage plus également dans le temps ;
- Déplacer la pointe électrique du bâtiment hors des périodes de pointe d'Hydro-Québec.

Dans le premier cas, la pratique permettrait de réduire la facturation énergétique du bâtiment soit en réduisant la puissance maximale mensuelle facturée (tarif M seulement) ou en permettant au site de limiter sa puissance maximale annuelle sous les 65 kW et ainsi demeurer au tarif G, qui ne facture pas la pointe mensuelle. Dans le second cas, le bénéfice immédiat sur la facture énergétique du bâtiment est nul. Toutefois, certaines options tarifaires (Tarif Flex G, Options d'électricité interruptible, Option de gestion de la demande de puissance) incluent des crédits en hiver lorsqu'un site, à la demande d'Hydro-Québec, réduit sa consommation par rapport à sa consommation habituelle pendant les périodes de pointe du réseau (HQ a, 2021). La capacité de déplacer la pointe du bâtiment amenée par l'ATC permettrait donc une participation à ces tarifs avec les économies associées.

4.2.1 Stratégies de charge et décharge

Deux approches générales ressortent des stratégies mises en place dans les sites étudiés : le déplacement des charges et le nivellement de charge.

Déplacement de pointe

Cette stratégie implique de n'autoriser la charge des accumulateurs que durant les périodes inoccupées du bâtiment en implémentant un horaire. L'horaire typique implémenté dans les trois sites où cette technique est appliquée permet la charge en semaine de 4pm à 8am le lendemain, soit hors de la période de pointe attendue du bâtiment. Un tel exemple est illustré à la Figure 13 où les périodes autorisées à la charge sont indiquées par l'autorisation ayant une valeur de 1 et les périodes sans autorisation sont indiquées par une autorisation nulle. Durant les périodes autorisées, la puissance appelée par l'appareil sera modulée de façon à respecter la puissance maximale mensuelle établie pour le compteur auquel est raccordé l'accumulateur.

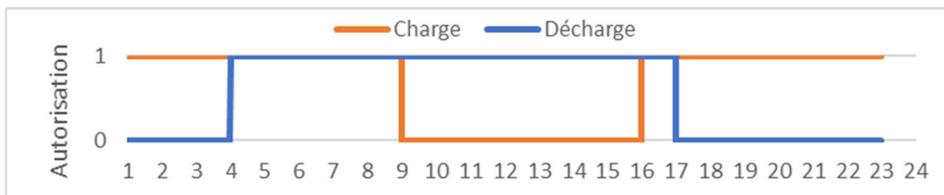


Figure 13: Fréquence horaire d'opération de l'accumulateur du site #10, opéré en déplacement de pointe

Dans les trois sites où cette stratégie fut mise en place, l'autorisation à la décharge de la chaleur dans le réseau d'eau chaude est, au contraire, limitée aux périodes d'occupation du bâtiment. L'horaire typique implémenté permettra la décharge en semaine de 4am à 4pm. Un tel exemple est illustré à la Figure 13 où les périodes autorisées à la décharge sont indiquées par l'autorisation ayant une valeur de 1 et les périodes sans autorisation sont indiquées par une autorisation nulle. Conséquemment, cette stratégie ne permettra une décharge et charge simultanée de l'appareil que pendant quelques heures chaque jour (4 à 9 et 16 à 17).

Cette approche permet d'éviter de décharger l'appareil la fin de semaine, à un moment où le bâtiment n'est pas en situation de pointe. La technique requiert toutefois que l'appel de puissance du bâtiment ait un comportement connu et prévisible afin de pouvoir choisir l'horaire d'autorisation de charge/décharge adéquatement.

Nivelage des charges

Cette stratégie n'utilise aucun horaire spécifique pour la recharge ou la décharge des accumulateurs. L'approche implémentée est plutôt de moduler la recharge de façon à ne jamais dépasser la puissance maximale établie pour le compteur, sans formellement proscrire la recharge durant des périodes prédéfinies. La puissance maximale autorisée sera habituellement fixée sur une base mensuelle pour se lier à la facturation ; on y réfère parfois comme la *puissance de délestage* du bâtiment. Le choix de cette puissance maximale est primordial. Un optimum doit être identifié permettant de limiter la facturation électrique du site tout en assurant que l'accumulateur ait la capacité requise pour se recharger adéquatement sur une base quotidienne. La majeure partie des sites étudiés rapportent utilisés une puissance de délestage mensuelle, estimée sur la base d'un historique de consommation, et le peaufiner en opération.

Selon le profil d'utilisation des autres postes de consommation du compteur auquel est raccordé l'accumulateur, les profils de puissance consommée pour la charge de l'ATC et de puissance fournie au réseau de chauffage (décharge) peuvent varier largement. Quelques exemples de profils journaliers typiques sont illustrés à la Figure 14 ci-dessous.

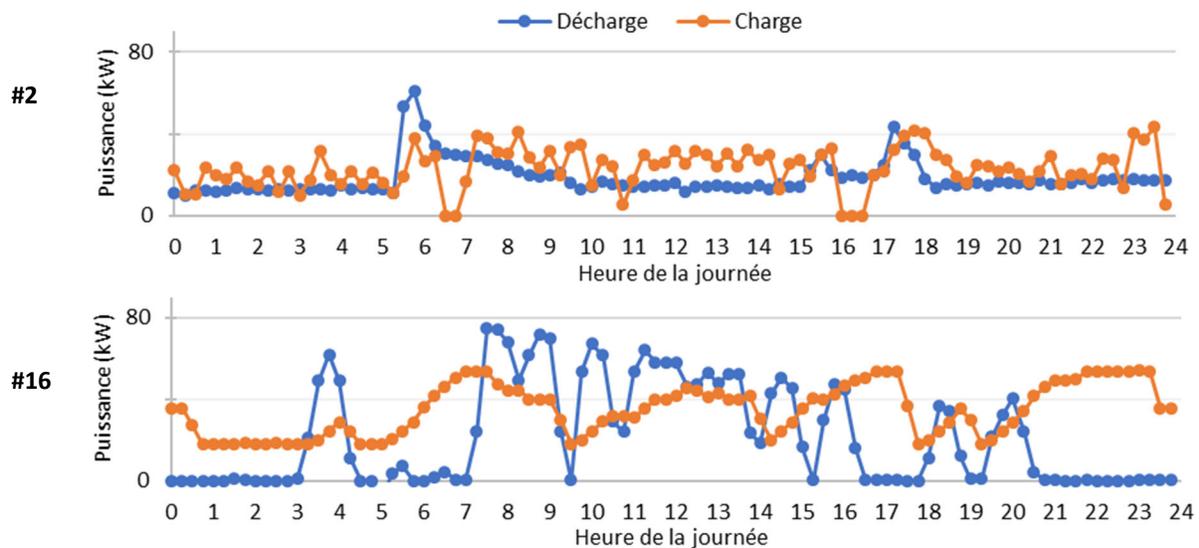


Figure 14: Profil typique d'opération de l'ATC des sites #2 et #16 pour des jours de semaine, opéré en nivelage de charges

Dans le cas du site #2, on remarque que le profil d'appel de puissance de l'ATC sur le réseau est relativement constant sur les 24 heures de la journée, et garde une valeur sous les 40 kW. À deux moments (entre 7-8h et 17-18h), la charge est nulle pour ce site, car la différence entre la puissance de délestage et la puissance appelée du bâtiment ne laisse aucune marge de manœuvre à l'accumulateur pour se charger. Dans le cas du site #16, la charge varie plus fortement en fonction de la puissance disponible.

La stratégie de nivelage de charges, utilisée sur 15 des sites étudiés, emploie différentes méthodes de contrôle de la décharge des accumulateurs. Lorsque l'accumulateur est l'unique source de chauffage (sites #2 et 6) ou est la **source principale** (#1, 3-4, 7-8), il se décharge en tout temps selon les besoins. Il convient ici de souligner que le profil du site #2, illustré à la Figure 14 ci-dessus, en est un où l'ATC est la seule source desservant les besoins de chauffage du bâtiment. Une recharge presque constante de l'appareil, étalée sur les 24 heures de la journée, permet un appel de puissance relativement constant sur le réseau électrique tout en desservant des besoins thermiques variant dans le temps. Une telle stratégie est d'autant plus appropriée dans ce cas puisque la majeure partie du bâtiment n'est pas ventilé et qu'il n'est desservi que par un seul compteur au tarif G, pour lequel la puissance appelée n'est pas facturée. Pour les sites où l'accumulateur sert de chauffage auxiliaire, en support à une chaudière électrique (sites #5, 9, 12, 14-16), il se décharge dès que la température de consigne de la boucle de chauffage n'est pas rencontrée par la chaudière seule. C'est le cas du site #16 illustré à la Figure 14 où on remarque une décharge plus importante durant les heures de pointe du matin (7 à 9h). Au site #17, l'accumulateur ne peut se décharger que durant les périodes hors

pointe, identifiées en comparant la puissance appelée instantanée du bâtiment à la *puissance de délestage*, limitant fortement son utilisation.

Finalement, il est important de souligner qu'aucun des sites n'a indiqué effectuer une révision périodique de la puissance de délestage choisie pour chaque mois du calendrier. Au contraire, il apparaît qu'une fois sélectionnées, ces valeurs sont maintenues d'année en année, sans soucis à la rigueur de l'hiver anticipé ou aux améliorations écoénergétiques effectuées (p.ex. changement de luminaires incandescents à l'éclairage DEL) pouvant réduire la puissance électrique appelée du bâtiment.

Bonne pratique 15 :

Que les opérateurs effectuent une révision périodique de la puissance de délestage mensuelle en fonction de la rigueur de l'hiver anticipé ou de toute amélioration écoénergétique effectuée pouvant réduire la puissance électrique appelée du bâtiment.

Recommandation 7 :

Qu'un outil permettant de faire un ajustement automatique de la puissance mensuelle de délestage soit développé et rendu accessible aux opérateurs.

4.2.2 Niveau d'énergie ciblé

La quantité d'énergie contenue dans l'accumulateur dépend de la température de ses briques. Les accumulateurs centraux étudiés (ThermElect modèle 9150 et 9180) sont considérés pleinement chargés à une température de 760°C ; ils contiennent alors 290 kWh et 440 kWh de chaleur, respectivement (Steffes, 2020). Certaines versions plus récentes sont réputées pouvoir atteindre jusqu'à 800°C, quoique le fabricant ne recommande pas de maintenir de telle température sur de longues périodes, car cela accélère le vieillissement des composantes. Or, puisque les pertes thermiques vers l'air ambiant de la chaufferie augmentent avec la température des briques, il peut être contreproductif de charger l'accumulateur jusqu'à cette température si les besoins de chauffage ne le nécessitent pas à court terme. Trois approches apparaissent dans les sites étudiés pour fixer la température de consigne des briques : la consigne mensuelle, la température extérieure actuelle et la prévision journalière.

Consigne mensuelle

Les concepteurs du réseau de chauffage déterminent une consigne de température mensuelle pour les briques de l'accumulateur. Ainsi, l'accumulateur tentera de maintenir cette température de briques en tout temps durant le mois, tant de jour que de nuit, la semaine comme la fin de semaine. Un choix judicieux de la consigne mensuelle est important pour assurer que la capacité requise de chauffage sera disponible au moment opportun tout en limitant les pertes thermiques inutiles. Un exemple d'opération est présenté à la Figure 15 ci-dessous.

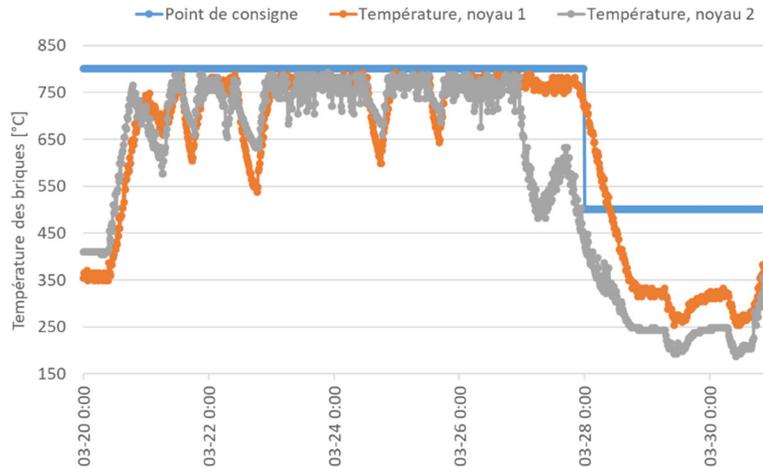


Figure 15: Opération d'un accumulateur ThermElect9150 sur la base d'une consigne mensuelle de niveau de charge (site #18)

On remarque à la Figure 15 que la température de consigne change de 800°C à 500°C le 28 mars à minuit. Depuis le 21 mars, l'accumulateur avait maintenu une température moyenne supérieure à 450°C ; il ne se déchargeait donc pas significativement depuis 7 jours, conservant un niveau d'énergie au-delà de 64% de sa capacité totale durant cette période. Le niveau d'énergie choisie était donc excessif vis-à-vis des besoins de cette semaine spécifique. Une modulation active de la consigne de température des briques aurait dans ce cas permis de réduire les pertes thermiques et ne pas user prématurément les composants.

Température extérieure actuelle

Lorsque la température extérieure actuelle est exploitée, le BMS accède à la lecture d'une sonde de température placée à l'extérieur du bâtiment et utilise celle-ci pour fixer le niveau d'énergie à cibler par l'accumulateur. La consigne transmise à l'appareil est changée en temps réel en fonction de la température extérieure actuelle. Il est important de noter qu'un accumulateur ThermElect9180 complètement vide prendra 5,5 heures à se recharger avec l'appel de puissance maximale de 80 kW, et ce, s'il ne se décharge aucunement durant cette période. En opération, un ATC peut avoir plutôt besoin de 8 ou même 12 heures pour se recharger complètement. Conséquemment, une approche basée sur la température actuelle peut mener à l'incapacité du système à assurer le chauffage nécessaire durant l'entre-saison, un moment où la température extérieure peut varier de plus de 10-15°C d'un jour à l'autre. C'est pourquoi une telle technique ne devrait être utilisée que dans les sites où une source de chauffage alternative est disponible.

Prévision journalière

Pour éviter les enjeux de sous-capacité susmentionnés, l'alternative à privilégier est d'utiliser une prévision des conditions météorologiques à venir, accessible par le BMS via un lien web vers un serveur météo. La température minimale anticipée pour les 24 prochaines heures sera utilisée pour fixer le niveau d'énergie à cibler par l'accumulateur et la consigne sera révisée sur une base horaire. Une telle pratique permet de limiter la recharge inutile de l'accumulateur lorsque des températures plus clémentes sont attendues le jour suivant et de prévenir le manque de capacité du système lors de journée particulièrement froide (Bonne pratique 3). Cette technique est d'ailleurs celle utilisée dans tous les sites où l'accumulateur est la seule source de chauffage (#2 et 6). Les CSS avec le plus d'expérience de la technologie ont également utilisé cette technique dans tous leurs sites (#1-7, 15-16).

Mode Intellicharge et configuration interne de l'accumulateur

L'accumulateur offre la possibilité de fixer le niveau d'énergie ciblé en considérant à la fois la température extérieure actuelle et l'historique de chauffage des 6 dernières heures, permettant d'adresser au moins partiellement les enjeux de sous-capacité en mi-saison mentionnés précédemment. Ce mode, nommé *Intellicharge*, a été activé sur 1 seul des

18 sites étudiés⁸. Dans ce cas, bien que le BMS continue d'envoyer certaines consignes à l'ATC (autorisation de charge, modulation de la capacité puissance disponible, etc.), c'est la logique interne de l'appareil qui fixe le niveau d'énergie ciblé. Il a d'ailleurs été constaté sur ce site que les sondes de température extérieure semblent défectueuses, conséquemment, l'appareil est maintenu à une température relativement faible (200 à 300°C) durant la majeure partie de la saison hivernale et n'est que peut solliciter.

Inoccupation prolongée et pertes thermiques

Outre les enjeux de sous-capacité discutés précédemment, limiter les pertes thermiques des accumulateurs est le second objectif majeur à considérer lors du choix de la stratégie de contrôle de l'unité. Pour les sites où l'accumulateur dessert le chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (noté « OA » au Tableau 8), la capacité requise de l'appareil pour la journée à venir sera influencée par le statut d'occupation du bâtiment, en plus des conditions extérieures attendues. Il est donc important d'ajuster la stratégie de contrôle de l'accumulateur pour éviter de charger de manière excessive avant une période d'inoccupation prolongée (p. ex. les fins de semaine, le temps des fêtes, ou la relâche scolaire).

Dans le cas d'un site fonctionnant selon un horaire de déplacement des pointes, l'horaire imposé peut empêcher la recharge du vendredi soir au dimanche en fin de journée. Ainsi, la température des briques de l'accumulateur restera relativement faible durant la fin de semaine, réduisant les pertes thermiques inutiles. Cette méthode fut notamment implémentée au site #11 où la recharge est proscrite de 7pm le vendredi à 4pm le dimanche.

Dans le cas des sites fonctionnant en nivelage des charges, et donc sans horaire, il est important de limiter la recharge au début d'une période d'inoccupation prolongée même si la puissance appelée disponible sur l'entrée électrique permet la recharge complète de l'appareil. Pour ce faire, certains sites ont introduit une sous-routine réduisant la température ciblée des briques durant les fins de semaine, ou réduisant la puissance appelée disponible à l'appareil durant ces mêmes périodes.

Bonne pratique 16 :

Que l'horaire d'occupation du bâtiment soit considéré dans le développement de la stratégie de contrôle de l'ATC de façon à limiter la charge de celui-ci avant une période d'inoccupation prolongée.

4.2.3 Conclusions émanant de l'étude des stratégies de commande

L'étude des stratégies de contrôles des sites indique que l'utilisation d'une prévision de la température minimale à venir est un choix judicieux pour assurer la disponibilité et limiter les pertes thermiques des accumulateurs (Bonne pratique 3). De même, une bonne connaissance tant de l'horaire que du calendrier d'occupation du bâtiment est requise si l'accumulateur doit desservir des besoins de chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA ») pour mettre sur pied une stratégie de contrôle minimisant les pertes thermiques (Bonne pratique 16). Il apparaît qu'en l'absence d'un historique de consommation détaillé ou d'une modélisation du réseau de chauffage, une nouvelle installation d'accumulateur nécessitera au moins une saison d'opération afin de peaufiner la relation fixant le niveau d'énergie à cibler par l'accumulateur et la *puissance de délestage* du site.

Finalement, une révision périodique de la puissance de délestage choisie pour chaque mois du calendrier serait souhaitable pour optimiser la facturation (Bonne pratique 15). Or, dû aux ressources limitées dans les bâtiments étudiés, en l'absence d'un algorithme permettant de faire un tel ajustement de façon automatiser au niveau du BMS (Recommandation 7), il n'est pas plausible d'anticiper une telle révision par les CSS.

⁸ Le mode *Intellicharge* doit être activé à travers les paramètres L010 et L011 pour être pleinement actif (Steffes, 2019).

Chapitre 5 – Performance des ATC

5.1 Méthodologie de calcul

Une priorité du mandat est de produire des données probantes sur la performance d'accumulateurs installés dans des sites institutionnels. Cette performance de l'ATC est estimée sur la base de quatre (4) flux thermiques :

- la puissance thermique fournie au réseau d'eau de chauffage du bâtiment, $\dot{Q}_{fournie}$,
- la puissance électrique appelée ou consommée par l'ATC, \dot{Q}_{conso} ,
- les pertes thermiques de l'appareil vers l'air ambiant de la chaufferie, \dot{Q}_{pertes} , et
- le changement d'énergie stockée dans l'ATC sur une période de temps donnée, \dot{Q}_{stock} .

Pour calculer ces puissances, des données d'opération ont été extraites du système de gestion du bâtiment (*Building Management System* ou BMS en anglais) sur une base sous-horaire. Celles-ci incluent l'autorisation de recharge de l'ATC, la modulation de recharge autorisée, la consigne d'énergie ciblée, l'autorisation de décharge de l'ATC, l'activation et/ou l'ampérage de la pompe de circulation, ainsi que la température de l'eau de chauffage entrant et sortant de l'ATC. Pour certains sites, des extrants de l'ATC étaient également disponibles sur une base sous-horaire (p. ex. la température de chaque noyau de briques, le nombre d'éléments chauffants actifs par noyau, la température de l'eau de chauffage sortant de l'ATC) et ont pu être exploités. La configuration de la commande des ATC, accessible via les localisations L000 à L099, a également été exploitée afin d'interpréter la réponse de l'ATC aux différents signaux envoyés par le BMS.

Les données de puissance appelée des bâtiments mesurées aux 15 minutes ont été fournies par Hydro-Québec et utilisées pour recréer la facturation électrique. Les quatre puissances décrites ci-dessus ont été calculées à partir des données d'opération, et une valeur moyenne sur un pas de temps de 15 minutes a été produite pour se comparer à la facturation d'Hydro-Québec.

Pour 8 sites totalisant 14 ATC, le débit d'eau de chauffage circulant dans l'ATC a pu être vérifié par des mesures sur site à l'aide d'un débitmètre portable à ultrasons⁹. La précision estimée pour ces valeurs de débit est de $\pm 2\%$. Pour 13 de ces 14 ATC, le débit mesuré était plus faible que le débit spécifié aux plans (de 4% à 74% plus faible). Le contexte de la pandémie ayant limité les déplacements, les visites de vérifications et de mesurage sur site ont dû être suspendues. Pour les autres sites, en l'absence de débit mesuré, celui-ci a été calculé sur la base de lois de similitude et de l'ampérage de la pompe de circulation fournit dans les données d'opération. La précision de ces calculs fut estimée en comparant les débits calculés à ceux mesurés sur 2 sites et 4 ATC. L'écart général constaté est une surestimation du débit de $\sim 10\%$ avec la méthode calculée.

Dû à l'annulation des visites sur site, les pertes thermiques n'ont pu être mesurées sur aucun des sites étudiés. Elles furent plutôt calculées sur la base d'une relation créée à partir des données d'opération durant des périodes d'attente (ni charge ni décharge) et des données du fabricant (Steffes, 2020). L'incertitude est estimée à ± 2.2 kW par pas de temps, sur la base de la précision des sondes de température des briques de l'ATC.

Similairement, la puissance électrique consommée n'a pu être mesurée sur aucun des sites et fut plutôt calculée sur la base des données d'opération extraites du BMS et de la configuration de la commande des ATC. Similairement, une vérification de l'intégrité des éléments chauffants n'a pu être effectuée par l'équipe de recherche. Lorsque des informations fournies à ce sujet par les centres de services scolaires (CSS) étaient disponibles, elles ont été utilisées pour confirmer le nombre d'éléments chauffants fonctionnels.

La priorité a été donnée à l'obtention d'un bilan énergétique cohérent pour chacun des appareils par la calibration. Les principaux paramètres de la calibration furent le débit d'eau de chauffage (pour les sites où le débit n'avait pas été mesuré), la température de sortie de l'ATC (pour les sites où deux valeurs étaient disponibles) et l'ajustement de la relation des pertes thermiques. Or, sur la base des spécifications du fabricant (Steffes, 2016), la puissance réellement consommée durant la recharge d'un ATC est susceptible de varier de 5% autour de la puissance théorique, et ce, si les éléments chauffants défectueux ont été remplacés. Puisque seuls quelques-uns des sites étudiés

⁹ Le principal modèle utilisé est un Dynasonics DXN, mais un Endress and Hauser Proline Prosonci Flow 91 HART fut également utilisé pour le site #10 où 3 ATC sont présents.

effectuaient une telle vérification de la résistance électrique des éléments en début de saison, il fut également considéré acceptable de calibrer la puissance consommée à la baisse en nombre entier d'éléments défaillants pour rétablir un bilan cohérent.

Dans certains cas, cette approche de calibration fut insuffisante pour assurer une cohérence globale du bilan énergétique de l'appareil. La cause de certaines anomalies n'a pu être confirmée et conséquemment, certains ATC et certains sites ont dû être exclus de l'analyse de performance.

5.2 Scénario de substitution

Deux scénarios (ci-après nommés « scénarios de substitution ») furent retenus pour quantifier la contribution de l'accumulateur vis-à-vis d'autres technologies susceptibles d'avoir été installées en lieu et place des ATC. Le choix de l'un ou l'autre des scénarios est fait sur la base des sources de chauffage actuellement présent dans le bâtiment et le respect ou non du seuil de pénétration autorisée pour les combustibles selon le PACC 2020 (MÉRN, 2016). Ce plan d'action fixe en effet un plafond de 15% pour la consommation totale annuelle de combustible par rapport à la consommation totale annuelle d'énergie du bâtiment. Tout bâtiment ayant présentement un seuil de pénétration de combustible inférieur à 15% sera réputé satisfaire le critère d'Exemplarité de l'État (voir le Tableau 8).

Le premier scénario est tout électrique. Il présume qu'une chaudière électrique aurait pris en charge l'entièreté de la puissance thermique fournie par l'ATC, avec un rendement de 100% entre la puissance thermique fournie et la puissance électrique consommée. Ce scénario est favorisé dans les bâtiments où l'électricité est la seule source de chauffage présentement (sites #2, 6, 12-16) ou pour les sites utilisant actuellement des combustibles, mais pour lesquels le critère d'Exemplarité de l'État ne permet pas d'augmenter l'usage de ceux-ci (sites #1, 9, 11, 17).

Le second scénario en est un de biénergie. Il présume que la chaudière aux combustibles déjà présente sur le site aurait pris en charge les pointes de puissance thermique fournie par l'ATC et que le reste de la puissance aurait été desservie par la chaudière électrique. Concrètement, une puissance maximale théorique est calculée de façon à ce qu'au-delà de cette valeur, toute la puissance thermique fournie par l'ATC soit réputée fournie par la chaudière au combustible et en deçà de celle-ci, la puissance thermique est fournie par la chaudière électrique. Cette puissance maximale est fixée en octroyant à la chaudière au combustible les pointes de puissance thermique fournie, par tranche de 5 kW, jusqu'à l'atteinte du plafond de 15% la consommation totale annuelle d'énergie du bâtiment (c.-à-d. le critère d'Exemplarité de l'État). Dans ce scénario, le rendement présumé de la chaudière aux combustibles reprend la valeur indiquée dans le PACC 2020 (MÉRN, 2016) de 83% entre la puissance thermique fournie et la puissance électrique consommée. Le pouvoir calorifique du combustible utilisé est aussi tiré de la même source. Ce scénario est favorisé dans les bâtiments où les sources de chauffage actuelles incluent au moins un combustible et pour lesquels le critère d'Exemplarité de l'État est satisfait (sites #3-5, 7, 10, 18).

Dans le cas du site #10, du mazout était utilisé sur le site en hiver 2020-2021. Or, le PACC 2020 visait à remplacer les systèmes au mazout utilisés comme source principale de chauffage (MÉRN, 2016) et le Plan pour une économie verte 2030 (PEV 2030) reprend cet objectif avec la même échéance (MELCCC, 2020). Utiliser le mazout comme source d'énergie en remplacement des ATC n'étant pas une approche applicable à des installations futures d'ATC, le gaz naturel fut plutôt utilisé comme énergie de substitution. Cette approche était à la fois permise par le PACC 2020, jusqu'à concurrence de 15% de la consommation totale annuelle d'énergie, et est toujours permise par le PEV 2030 dans le but spécifique de mitiger les pointes hivernales de demande d'électricité. Afin de permettre une comparaison équitable, la consommation de mazout dans le scénario avec ATC (c.-à-d. le scénario actuel) fut également transformée en gaz naturel. La conversion de la chaudière au mazout existante en chaudière au gaz naturel a d'ailleurs été faite à l'été 2021, confirmant la validité de ce scénario. Pour les autres sites, le combustible du scénario de substitution était du propane (sites #4 et 5).

Il est à noter que les sites retenus comportent parfois plusieurs pavillons, chaufferies et compteurs électriques. La campagne de mesurage sur site ayant été interrompue, il fut impossible de confirmer avec exactitude les charges thermiques desservies par chacune des boucles de chauffage. Les pavillons étant interconnectés, les superficies desservies par une chaufferie plutôt qu'une autre se confondent également. En conséquence, il n'a pas été possible de traiter chaque pavillon comme un bâtiment distinct associé à un seul compteur ou de réconcilier les différentes portions de bâtiment desservir par un compteur spécifique. L'ensemble des besoins énergétiques de tous les

pavillons d'un même site ont donc été traités comme faisant partie d'un seul « bâtiment » pouvant être décrit par des caractéristiques s'appliquant à l'ensemble.

L'ensemble d'un site a également été considéré comme alimenté par un unique compteur électrique. L'analyse du rôle des accumulateurs sur la facturation énergétique est hautement sensible au nombre de compteurs et à la tarification applicable à chacun de ceux-ci. Le rôle du nombre et type de compteurs dans les décisions prises lors de la conception de la solution furent abordés dans les synthèses d'entrevues (section 3.1). Toutefois, le calcul des factures énergétiques des scénarios de substitutions est effectué en posant l'hypothèse qu'un compteur unique est associé à chaque site, avec la tarification applicable en date du 1^{er} avril 2021 (Hydro-Québec, 2021) selon l'ampleur de la charge desservie. Le résultat émanant de l'analyse pourrait différer significativement de la facturation réelle du site.

Le coût du combustible dépend de plusieurs facteurs qui fluctuent régulièrement selon les marchés, les distributeurs et le profil de consommation du bâtiment. Le calcul du coût du gaz naturel tient compte des paramètres suivants : fourniture du gaz, prix du système de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SDEPE), transport, équilibrage, inventaire, et distribution. La grande proportion du coût total est attribuable au prix de fourniture, au SPEDE et à la distribution. Comme ces frais fluctuent dans le temps, les taux moyens de décembre 2020 à avril 2021 de fourniture et du SPEDE rendus disponibles par Énergir sont considérés (Énergir, 2021). Les taux de transport, d'équilibrage, d'inventaire et de distribution sont calculés à partir de factures de gaz naturel d'un bâtiment appartenant au même CSS et qui est raccordé au réseau d'Énergir et abonné au tarif D1. Le coût moyen du propane fut extrait des factures des sites où ce combustible fut considéré. Le Tableau 9 présente le coût moyen des combustibles utilisés dans l'analyse économique.

Tableau 9: Coût des sources énergétiques et leurs émissions de GES respectives

Source énergétique	Coût	GES [kgCO ₂ eq/kWh]
Gaz naturel	0,380 \$/m ³	0,1804
Propane	0,52 \$/L	0,2054
Mazout	1,084 \$/L	0,2564
Électricité – Tarif G		0,0016
Frais d'accès au réseau	12,49 \$/30jrs	
Énergie >15 090 kWh	0,10029 \$/kWh	
<15 090 kWh	0,07719 \$/kWh	
Puissance >50 kW	17,869 \$/kW	
Électricité – Tarif M		0,0016
Énergie >210 000 kWh	0,05095 \$/kWh	
<210 000 kWh	0,03778 \$/kWh	
Puissance	14,77 \$/kW	

Les émissions de GES attribuables aux différentes sources énergétiques sont calculées à l'aide du facteur d'émissions moyen de GES et du facteur de conversion énergétique spécifiés au PACC 2020 (MEC2016). Conséquemment, l'utilisation de l'électricité est réputée engendrer 0,0016 kgCO₂eq/kWh.

5.3 Financement

Les entrevues effectuées avec les gestionnaires et concepteurs relèvent un recours assez faible aux programmes de subvention dans les projets où les accumulateurs furent installés par le passé. Toutefois, certains programmes récents permettent maintenant de financer au moins partiellement l'achat d'accumulateurs et sont présentés au Tableau 10.

Le programme Solutions Efficaces (HQ b, 2021) d'Hydro-Québec offre des incitatifs lorsque l'efficacité énergétique d'un bâtiment ou d'une usine est améliorée suite à une rénovation ou lors d'une construction neuve. L'installation d'accumulateurs thermiques est spécifiquement mentionnée parmi les produits admissibles à un appui financier,

tant pour les bâtiments institutionnels que commerciaux. L'outil de calcul d'appui financier indique que dès qu'une mesure d'efficacité énergétique liée au chauffage est mise en place dans un bâtiment, un appui financier est offert pour installer un accumulateur sur une boucle d'eau de chauffage majoritairement chauffée à l'électricité. L'appui financier offert pour l'ATC représente environ la moitié de son coût d'achat (16 240\$ pour une unité de 53 kW et 24 640\$ pour une unité de 80 kW), auquel s'ajoute l'appui pour la ou les autres mesures installées.

Tableau 10: Détails des programmes d'appui financier

Programme	Mesures	Appui financier
Solutions Efficaces, Hydro-Québec	Mesure d'efficacité énergétique liée au chauffage ET ATC (290 kWh) sur réseau d'eau chauffé à l'électricité	16 240\$ pour l'ATC
	Mesure d'efficacité énergétique liée au chauffage ET ATC (440 kWh) sur réseau d'eau chauffé à l'électricité	24 640\$ pour l'ATC
EcoPerformance, Transition énergétique Québec	Retrait d'une chaudière au combustible et remplacement par un appareil fonctionnant à l'électricité.	Jusqu'à 75 % des coûts admissibles.

Le programme ÉcoPerformance de Transition énergétique Québec (TéQ, 2020) appui également les initiatives permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation énergétique des bâtiments. Le volet Implantation simplifiée offre un programme spécifique pour la conversion du chauffage au mazout ou au propane à l'énergie renouvelable. Le calcul de l'aide se base sur la consommation réelle annuelle de combustible des deux dernières années et peut monter jusqu'à 75 % des coûts admissibles. Un projet de conversion du chauffage majoritairement au combustible vers l'électricité (avec ou sans ATC) serait éligible.

L'analyse des scénarios de substitution ne s'appuyant que sur les coûts énergétiques d'une saison de chauffage, l'appui financier offert par ces programmes ne fut pas considéré.

5.4 Résultats et analyse

Sur les 18 bâtiments étudiés, les résultats détaillés de l'étude de performance de 11 bâtiments et de 18 ATC sont présentés sur les fiches des sites en annexe. Pour chaque ATC, l'énergie fournie, l'énergie consommée et les pertes thermiques, déterminées à partir des données d'opération récoltées, pour la saison d'hiver 2020-2021 sont présentées. À partir de ces données, un rendement saisonnier, η , est calculé permettant de communiquer rapidement le ratio de l'énergie saisonnière fournie par l'ATC au réseau de chauffage du bâtiment relativement à l'énergie électrique saisonnière consommée. Une synthèse est présentée au Tableau 11 avec la capacité et l'usage des ATC étudiés.

Les résultats de l'étude de performance soulignent la contribution des ATC au bâtiment où ils sont installés. Pour la majorité des bâtiments où l'ATC est utilisé comme source principale du réseau de chauffage (sites #1-5 et 18), ils réussissent à fournir l'énergie de chauffage requise avec une contribution minimale des sources auxiliaires. Cinq (5) de ces sites (sites #1-5) satisfont le critère d'Exemplarité de l'État (voir le Tableau 8) faisant un usage minimal du combustible (<6%). On remarque que l'ajout d'une chaudière électrique sur le site #5, en plus des deux ATC et de la chaudière au propane, réduit la contribution des ATC. Sur ce site, les deux ATC fournissent 145 700 kWh au réseau de chauffage en comparaison aux 185 300 kWh et 182 000 kWh fournis sur les sites 3 et 4, qui ont une taille et des besoins similaires. L'usage intermittent fait de l'ATC2 sur ce site réduit son rendement saisonnier. En effet, bien qu'il n'est appelé à ne contribuer que 23 000 kWh au réseau de chauffage, il est maintenu au même niveau d'énergie ciblée (c.-à-d. même température moyenne des briques) que l'ATC1 qui lui fournit 122 700 kWh. Les pertes thermiques d'ordre similaire (11 200 contre 10 300 kWh) se retrouvent donc représenter une part plus importante de l'énergie consommée par l'ATC2, réduisant son rendement saisonnier. L'analyse indique que la priorité donnée à la chaudière électrique pourrait être reconsidérée pour augmenter l'usage de l'ATC2 et améliorer son rendement.

Tableau 11: Sommaire des résultats de performances des ATC

ID. site	Superficie (m ²)	DJ _c	ID. ATC	Capacité ATC	Usage	E _{fournie} [kWh]	E _{perdes} [kWh]	η	Pointe [kW]	Facture
1	1 438	4 133	1	80 kW	Source princ.	42 700	10 600	78%	89	11 500\$
2	901	4 133	1	80 kW	Source princ.	33 400	12 700	70%	57	6 800\$
3	4 201	4 133	1	80 kW	Source princ.	75 000	10 600	86%	152	29 300\$
			2	80 kW		110 300	6 100	88%		
4	4 402	4 133	1	80 kW	Source princ.	50 100	8 500	86%	157	23 500\$
			2	80 kW		58 500	8 400	86%		
			3	80 kW		73 400	8 000	89%		
5	3 904	4 133	1	80 kW	Source princ.	122 700	10 300	88%	157	21 200\$
			2	80 kW	Pointe	23 000	11 200	73%		
6	3 600	4 133	1	80 kW	Source princ.	n.d.	n.d.	n.d.	155	23 000\$
			2	80 kW		n.d.	n.d.	n.d.		
7	1 633	4 133	1	80 kW	Source princ.	n.d.	n.d.	n.d.	89	9 600\$
8	24 074	3 931	1	80 kW	Source princ.	n.d.	n.d.	n.d.	1109	n.d.
9	7 742	3 931	1	80 kW	Pointe	62 200	9 900	83%	212	50 800\$
10	34 262	4 533	1	80 kW	Pointe	19 850	6 900	79%	1134	160 350\$
			2	80 kW		22 600	6 400	84%		
			3	80 kW		20 700	6 400	73%		
11	18 628	4 533	1	80 kW	Pointe	1 400	1 200	58%	359	71 800\$
			2	80 kW		10 200	6 300	66%		
12	5 786	4 966	1	80 kW	Pointe	0	6 700	0%	220	36 850\$
13	4 413	4 966	1	80 kW	Pointe	n.d.	n.d.	n.d.	184	n.d.
14	3 303	4 966	1	80 kW	Pointe	n.d.	n.d.	n.d.	196	n.d.
			2	80 kW						
15	2 822	4 342	1	80 kW	Pointe	n.d.	n.d.	n.d.	149	n.d.
16	3 704	4 342	1	80 kW	Pointe	56 300	4 650	89%	145	18 400\$
17	2 356	5 321	1	53 kW	Pointe	n.d.	n.d.	n.d.	93	n.d.
18	2 242	5 321	1	53 kW	Source princ.	82 400	4 400	96%	62	14 700\$

Le site #18 fait exception. Bien que l'ATC y soit la source principale de chauffage (82 400 kWh fournis), l'usage du mazout sur ce site demeure important (44 200 kWh consommés). Ce recours important au combustible explique la pointe électrique saisonnière significativement inférieure à celle des autres sites de taille similaire. Il est important de souligner que ce site a un ATC de capacité inférieure à ceux des sites #1 à 5 (53 kW vs 80 kW) malgré un hiver typiquement plus rigoureux. En regard des résultats des sites similaires, il est estimé que ce site pourrait effectuer une conversion à l'électricité en ajoutant une seconde unité d'une capacité de 80 kW tout en n'entraînant qu'une légère augmentation de la facture énergétique saisonnière (~1000\$).

Pour les sites où les ATC sont utilisés comme outils de gestion de la pointe (sites #9-12 et 16), en support à d'autres sources de chauffage (chaudière électrique ou au combustible), on remarque une contribution significativement moins importante des ATC à leur réseau. Alors que l'énergie fournie saisonnière est en moyenne de 65 450 kWh pour les ATC des sites #1 à 5, celle-ci n'est que de 24 150 kWh sur les sites #9-12 et 16. Les unités sont en moyenne maintenues à un niveau d'énergie ciblée plus faible ce qui réduit également l'ampleur de leurs pertes thermiques vis-à-vis des unités opérées comme source principale de chauffage (6 050 contre 9 600 kWh). Leur rendement saisonnier est ainsi du même ordre de grandeur que les précédentes. Le site #12 fait exception. Dans ce cas, un problème mécanique empêche la décharge efficace de l'ATC et sa contribution au réseau de chauffage du site est nulle. Sachant que l'unité a consommé 6 700 kWh à l'hiver 2020-2021 pour maintenir son niveau d'énergie ciblé, il serait important d'en effectuer une remise au point (*recommissioning*, en anglais) rapidement.

Le Tableau 12 résume les résultats des 9 sites pour lesquels un scénario de comparaison a pu être généré. Les sources de chauffage sont indiquées, avec la source principale en gras. L'impact de l'ATC sur la facturation énergétique, l'émission de GES et la pointe électrique de la saison hivernale sont également listés.

Tableau 12: Résumé des scénarios de comparaison des sites

No. site	Capacité inst. [kW]	Jour/nuit [kW]	Sources de chauffage	Facturation saisonnière		GES saisonnier [t. éq. CO ₂]		Pointe électrique saisonnière [kW]	
				Impact de l'ATC	Valeur sans ATC	Impact de l'ATC	Valeur sans ATC	Impact de l'ATC	Valeur sans ATC
Scénario 100% électrique									
1	80	7,9	Élec. ; Prop.	-2 500\$	14 000\$	nul	1	-51 kW	140 kW
2	80	5,5	Élec.	-1 500\$	8 300\$	nul	0,1	-44 kW	101 kW
9	80	11,3	Élec. ; GazNat	+1 900\$	48 900\$	nul	58	-37 kW	249 kW
11	160	49	Élec. ; GazNat	-750\$	72 550\$	nul	114	-19 kW	378 kW
16	80	10,1	Élec.	-2 200\$	20 600\$	nul	0,3	-68 kW	213 kW
18	53	5,3	Élec. ; Mazout	-1 600\$	16 300\$	nul	11	-30 kW	92 kW
Scénario biénergie									
4	240	24,2	Élec. ; Prop.	-1 400\$	24 900\$	-21,6	22	-5 kW	162 kW
5	160	35,4	Élec. ; Prop.	-1 100\$	22 300\$	-36	38	+35 kW	122 kW
10	240	270	Élec. ; GazNat ; Mazout*	+250\$	160 100\$	-13	28	nul	1134 kW

*Bien que du mazout était utilisé sur le site #10 à l'hiver 2020-2021, celui-ci a été transformé en gaz naturel lors de l'analyse des scénarios de comparaison.

On remarque une réduction significative des émissions de GES sur la durée de la saison hivernale pour les 3 scénarios biénergie, allant de 13 à 36 tonnes d'équivalent de CO₂. Dans ces trois cas, malgré l'ajout de consommation d'électricité pour le scénario avec ATC, on ne constate qu'une augmentation modérée de la pointe saisonnière de puissance appelée (-5 kW, 0 kW et +35 kW). Ces valeurs sont d'autant plus significatives que pour ces 3 sites, entre 2 et 3 ATC ont été installés soient de 160 à 240 kW de capacité additionnelle sur l'alimentation électrique du bâtiment. On constate également une réduction de la facturation énergétique saisonnière de plus de 1 000\$ pour 2 des 3 sites du scénario biénergie, alors que le troisième subit une augmentation négligeable de la facture saisonnière (+250\$ sur une facture d'environ 160 100\$). Ces trois cas d'étude permettent ainsi de confirmer que l'usage des ATC est favorable vis-à-vis du recours aux combustibles pour la gestion de la pointe, tant au niveau des émissions de GES, qu'au niveau de la facturation et de la pointe de puissance appelée.

Les six (6) scénarios où les accumulateurs ont été comparés à des chaudières électriques (« 100% électrique ») rapportent une forte réduction de la puissance de pointe saisonnière (19 kW à 68 kW). On constate également une réduction de la facture saisonnière dans cinq (5) des sites étudiés. Dans le cas du site #11, la réduction de la facture (750\$) est négligeable vis-à-vis de la facturation saisonnière d'environ 72 550\$. Dans le cas du site #9 toutefois l'impact sur la facture est plus important (+1 900\$ sur 48 900\$). Dans ce cas, malgré des économies sur la facturation de la puissance, dont la pointe saisonnière est réduite de 37 kW, la hausse d'énergie consommée porte la facture globale à grimper. Il est toutefois important de noter que cette augmentation de la puissance de pointe annuelle se répercutera sur la facturation non seulement hivernale, mais aussi sur celle des mois d'été. Cette augmentation potentielle de la facture énergétique annuelle n'a pas été prise en compte dans les coûts rapportés ci-dessus.

La différence entre la puissance moyenne durant les heures occupation (8am à 4pm) et d'inoccupation (8pm à 4am) est aussi listée au Tableau 12. Cette différence de puissance (étiquetée « jour/nuit ») a été établie à partir d'un scénario 100% électrique, sans contribution de l'ATC. La capacité des ATC installés, rapportée au Tableau 11, est également reprise au Tableau 12. On ne remarque aucune corrélation entre la différence de puissance jour/nuit et le succès de l'installation, tant du point de vue économique, qu'environnemental ou de réduction de la pointe.

Conclusion

Le rapport présente les résultats du projet de Stockage thermique et d'Exemplarité de l'État. L'inventaire, incluant les caractéristiques générales des bâtiments recensés et les technologies de stockage thermique qui s'y trouvent, furent présentés. Les accumulateurs thermiques électriques et les stratégies de contrôle visant la gestion de la demande dominant la liste comme technologie répertoriée dans le plus grand nombre de sites. L'inventaire démontre que la proportion de bâtiments utilisant l'électricité comme source de chauffage a connu une augmentation considérable, passant de 34 % à 68 %, après la mise en place du stockage. Tous les bâtiments qui utilisaient trois (3) sources d'énergie sont passés à deux sources (2), en éliminant le mazout soit la source la plus polluante utilisée dans les bâtiments institutionnels. Similairement, pour seize (16) des dix-huit (18) bâtiments retenus pour la phase d'étude détaillée, la rénovation au cours de laquelle l'accumulateur fut installé a permis une transition énergétique de leur système de chauffage vers une prédominance des énergies renouvelables.

Les résultats des entrevues effectuées avec les gestionnaires immobiliers furent présentés, soulignant le contexte dans lequel ces projets ont été effectués, les circonstances qui ont mené à l'adoption de la technologie, et la perception des gestionnaires vis-à-vis du processus d'acquisition des accumulateurs. La synthèse a permis d'identifier les bonnes pratiques au niveau des stratégies contractuelles lors de l'acquisition d'accumulateurs thermiques électriques dans un bâtiment institutionnel. Une tendance unanime souligne l'importance que l'équipe possède une bonne expertise avec les accumulateurs avant d'entreprendre un tel projet comme facteur clé de succès. Une mise en service améliorée aux frais du soumissionnaire et s'étalant sur la 1^{re} année de garantie est recommandée ainsi que le support du fabricant, autant durant l'installation que durant la première année d'opération. L'expertise relative à l'entretien et l'opération de l'unité doivent aussi être présentes à l'interne ou être supplémentées ponctuellement par des spécialistes de l'externe, particulièrement durant cette première année d'opération.

Une synthèse des entrevues effectuées avec les opérateurs de bâtiment a permis de mettre en lumière les leçons apprises par ceux-ci liées à l'installation, l'opération et l'entretien d'accumulateurs thermiques électriques centraux (ATC). Il en ressort que les accumulateurs sont perçus comme une technologie accessible par les opérateurs de bâtiments institutionnels. Le fait qu'ils s'intègrent aisément dans un réseau de chauffage hydronique existant, sans en changer la température d'opération, est un aspect facilitant. Toutefois, l'optimisation des séquences de contrôle des ATC requiert 1 à 2 hivers d'opération, se concentrant sur le choix judicieux du niveau d'énergie ciblé en fonction des conditions extérieures, actuelles ou anticipées, et de la puissance de délestage mensuelle du bâtiment. À ce titre, il est recommandé d'indiquer clairement à l'opérateur quels paramètres de la stratégie de contrôle devraient être ajustés au fil des saisons et lesquels ne doivent pas être modifiés. Similairement, une meilleure exploitation des données fournies par l'appareil au niveau du BMS pour détecter et diagnostiquer les défaillances et/ou bris de composants serait souhaitable pour faciliter le travail des opérateurs.

L'expérience des participants souligne que la stratégie de contrôle peut avoir un impact sur la durée de vie des composants et que cette relation est peu documentée. Afin de supporter les opérateurs dans la planification de l'entretien de futures installations, les remplacements de composants rapportés par les participants interrogés ont été répertoriés. Le Tableau 6 indique l'expérience des participants relativement aux remplacements de composants et inclut un ordre de grandeur des coûts des composants et du temps requis pour procéder à leur remplacement. Conséquemment, il est recommandé de prévoir un budget annuel de maintenance préventive, et de garder un moteur de ventilateur en inventaire pour un remplacement curatif imprévisible. Une fiche synthèse a également été produite, résumant les pratiques d'entretien préventif nouvellement recommandées le manufacturier et celles adoptées par les participants interrogés.

Le retour d'expérience des professionnels ayant été impliqués dans la conception de projets où des ATC ont été implémentés a permis de clarifier le processus de conception, d'identification des besoins et des contraintes du client et de son projet, de production de plans et devis, en passant par les méthodes de dimensionnement utilisées et les analyses de faisabilité technique et économique réalisées. Mis à part le besoin de gérer la demande d'électricité, le contexte de réalisation des projets de réfection de chaufferie vécus par les participants (délais et budgets faibles) ne

permettait pas une réfection complète du réseau de chauffage existant et appuyait le recours aux ATC. La capacité limitée de l'entrée électrique ainsi que le désire de réduire l'entretien et de faciliter l'opération de la chaufferie dans le cadre d'un projet de retrait de mazout sont également des facteurs supportant le recours aux ATC. Dans l'ensemble, les concepteurs s'entendent sur le fait qu'il est important de transmettre clairement aux opérateurs, leur intention derrière la conception et de souligner que le contrôle de l'équipement devra être ajusté durant les premières années d'opération.

Les données probantes, extraites des données d'opération des bâtiments retenus pour l'étude détaillée, furent présentées pour 11 bâtiments et 18 ATCs. Les sites investigués ont été décrits brièvement incluant la configuration de leur réseau CVCA, les stratégies de contrôle répertoriées et le succès de celles-ci. Ces données ont permis de faire ressorti certaines bonnes pratiques dont la nécessité de mettre en place un mode d'opération particulier pour les périodes d'inoccupation prolongées et d'utiliser une prévision des conditions météorologiques anticipées pour fixer le niveau d'énergie ciblé pour l'accumulateur. Les résultats de l'étude de performance soulignent la contribution des ATC au bâtiment où ils sont installés. Pour la majorité des bâtiments où l'ATC est utilisé comme source principale du réseau de chauffage, ceux-ci suffisent à fournir l'énergie de chauffage requise avec une contribution minimale des sources auxiliaires. Cinq (5) de ces sites (sites #1-5) satisfont le critère d'Exemplarité de l'État faisant un usage minimal du combustible (<6%). Pour les sites où les ATC sont utilisés comme outils de gestion de la pointe, la contribution énergétique des ATC au réseau de chauffage est moins importante. Il est alors important de s'assurer de ne pas maintenir l'unité à une température trop élevée sans quoi les pertes thermiques peuvent fortement réduire son rendement saisonnier.

Pour neuf (9) sites et un total de quinze (15) ATC, un scénario de comparaison a pu être généré pour faire ressortir la contribution de l'ATC à la facturation énergétique, aux émissions de GES et à la pointe de puissance saisonnière. Deux cas furent considérés soient le scénario « tout électrique », où une chaudière électrique est présumée assumer l'entièreté de la puissance thermique fournie par l'ATC, et un scénario « biénergie », où la chaudière aux combustibles déjà présente sur le site assume les pointes de puissance thermique fournie par l'ATC jusqu'à l'atteinte du plafond de 15% la consommation totale annuelle d'énergie du bâtiment (c.-à-d. le critère d'Exemplarité de l'État). Les trois (3) scénarios biénergie résultent en une réduction significative des émissions de GES (13 à 36 tonnes d'équivalent de CO₂) avec une augmentation modérée de la pointe saisonnière de puissance appelée (-5 kW, 0 kW et +35 kW). Pour 2 des 3 cas, la facturation énergétique saisonnière est réduite de plus de 1 100\$, alors que le troisième subit une augmentation négligeable (+250\$ sur une facture saisonnière de 160 100\$). L'usage des ATC est donc favorable vis-à-vis du recours aux combustibles pour la gestion de la pointe, tant au niveau des émissions de GES, qu'au niveau de la facturation et de la pointe de puissance appelée.

Une réduction importante de la puissance de pointe est constatée dans les six (6) scénarios « tout électrique » et une réduction de la facture énergétique saisonnière est présente dans 5 des 6 cas. Malgré des économies sur la facturation de la puissance, ces deux derniers cas soulignent l'importance de limiter les pertes thermiques de l'ATC par un choix judicieux du niveau d'énergie ciblé, sans quoi un faible rendement peut porter la facture saisonnière à la hausse.

Références

- (ACESE, 2018) Association canadienne des entreprises de services énergétiques. (2018). Mémoire déposé au Sénat du Canada par Stuart Galloway dans le cadre de l'Étude sur les effets de la transition vers une économie à faibles émissions de carbone. Repéré à : https://sencanada.ca/content/sen/committee/421/ENEV/Briefs/StuartGalloway_Follow-up2_f.pdf
- (Énergir, 2021) Énergir. (2021). Prix de fourniture du gaz naturel. Repéré à : <https://www.energir.com/fr/affaires/prix-de-fourniture-du-gaz-naturel/>. En date du 5 novembre 2021.
- (HQ a, 2021) Hydro-Québec. (2021). Tarifs d'électricité en vigueur le 1er avril 2021. Repéré à : <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/tarifs-electricite.pdf>
- (HQ b, 2021) Programme Solutions efficaces. Repéré à : <https://www.hydroquebec.com/affaires/programmes-outils/solutions-efficaces.html>
- (M. & L., 2007) Alain Moreau et Jean Lemay. (2007). Présentation « La gestion de la demande avec les accumulateurs thermiques » faite à l'AGPI. Avril 2007.
- (MÉES, 2018) Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement Supérieur. (2018). Bilan énergétique du réseau des commissions scolaires du Québec 2015-2016. Gouvernement du Québec. Repéré à : http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/education/reseau/Bilan-Energetique-Com-scolaire-2015-2016.pdf
- (MELCCC, 2020) Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques. (2020). Plan pour une économie verte 2030. Gouvernement du Québec.
- (MÉRN, 2016) Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2016). Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques: Modalités d'application des mesures d'exemplarité de l'État. Gouvernement du Québec.
- (Steffes, 2020) Steffes Corporation. (2020). Manuel d'utilisation et d'installation, ThermElect hydronique. Modèles 9150, 9180. ThermElect hydronique avec relais statique intégré. Version 2.18. Repéré à : <https://www.steffes.com/wp-content/uploads/2021/09/1200045-9100-Manual-French-V10.pdf>
- (Steffes b, 2020) Steffes Corporation. (2020). Master Supplemental Installer's Guide for Comfort Plus Commercial and ThermElect - Microprocessor Function Location Descriptions and Values for Setup and Editing. 49 p. Accessible sur demande au fabricant seulement.
- (Steffes c, 2020) Steffes Corporation. (2020). Fiche technique - 9100 ThermElect hydronique. Version 3. Repéré à : <https://www.steffes.com/wp-content/uploads/2020/06/TDS-ThermElect-French-Model-9150-9180-Rev-3.pdf>
- (Steffes, 2019) Steffes Corporation. (2019). Guide supplémentaire principale d'installation pour systèmes Comfort Plus Commercial et ThermElect. Version 2.00-2.10. 58p.
- (Steffes, 2016) Steffes Corporation. (2016). Heating Element Service and Repair Guide for 8100 & 9100 Series ThermElect. 8 p. Accessible sur demande au fabricant seulement.
- (Steffes, s.d.) Steffes Corporation. (s.d.). Technical Bulletin: Maximizing Element Life in ThermElect Heating Systems 8100 and 9100 Series. 2 p. Accessible sur demande au fabricant seulement.
- (TéQ, 2020) Transition énergétique Québec. Programme ÉcoPerformance, Petits commerces, institutions et industries, incluant le secteur agricole, Conversion du chauffage au mazout ou au propane à l'énergie renouvelable. Repéré à : <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/ecoperformance/implantation-simplifiee/petits-commerces-institutions-industries>
- (T.-L., 2019.) Sandrine Tremblay-Lemieux, 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 », Université Laval.

ANNEXE 1 – Appel à participer

**Ministère
de l'Éducation
et de l'Enseignement
supérieur**
Québec 
Direction générale des infrastructures

PAR COURRIEL

Québec, le 24 septembre 2019

Mesdames les Directrices générales et
Messieurs les Directeurs généraux
des commissions scolaires,

Objet : Appel à participer à un projet d'étude sur le stockage thermique

Par la présente, je voudrais solliciter votre participation à l'étude visant à documenter l'utilisation des technologies de stockage thermique dans vos bâtiments où elles sont installées. Cette étude se fait en partenariat avec l'École de technologie supérieure (ÉTS), le MEES, Hydro-Québec et Transition énergétique Québec (TEQ).

À cet effet, je vous invite à prendre connaissance de la lettre de la professeure Katherine D'Avignon responsable du projet afin d'en savoir davantage et pour connaître les modalités d'inscription.

Les constats qui seront dégagés de cette étude contribueront à aider la Direction générale des infrastructures à atteindre les cibles qui lui ont été fixées en matière de réduction de consommation énergétique dans le Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques 2018-2023.

Pour des renseignements additionnels, je vous invite à communiquer avec M. Darius Tsé, responsable de ce dossier à la Direction de l'expertise et du développement des infrastructures scolaires, au 418 644-2525, poste 2490, ou à l'adresse darius.tse@education.gouv.qc.ca.

Je vous prie de recevoir mes salutations distinguées.

Le directeur général des infrastructures,



Patrick Lachapelle

p. j. 1

c. c. Directrice et directeurs des ressources matérielles des commissions scolaires

1060, rue Louis-Alexandre-Taschereau
Aile Jacques-Parizeau, 3^e étage
Québec (Québec) G1R 5E6
Téléphone : 418 644-2525
www.education.gouv.qc.ca



Le génie pour l'industrie

École de technologie supérieure
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec) Canada, H3C 1K3
Téléphone : 514 396 8844
Télécopieur : 514 396 8584

Département de génie de la construction

Montréal, le 27 août 2019

Sujet : Appel à participer à un projet d'étude sur le stockage thermique

Madame, Monsieur,

Dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques et de la volonté du gouvernement du Québec de mettre en œuvre des mesures d'exemplarité de l'État dans ce domaine, l'École de technologie supérieure (ÉTS) a été mandatée pour effectuer une étude sur l'utilisation du stockage thermique dans les bâtiments des commissions scolaires du Québec. Cette étude se fait en partenariat avec Transition énergétique Québec (TEQ) et avec la participation du ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES) et d'Hydro-Québec (HQ).

La présente a pour but de solliciter votre participation à cette étude qui vise à documenter l'expérience acquise des bâtiments où des technologies de stockage thermique ont été installées en vue d'en dégager les conditions gagnantes.

Les technologies visées incluent : les accumulateurs thermiques à briques réfractaires (ex. ThermÉlect), les réservoirs de matériaux à changement de phase, les réservoirs de liquide (eau, huile, eau salée, etc.), les stockages souterrains (roches, aquifères, cavernes, puits géothermiques, etc.) et le stockage chimique.

Notre équipe de recherche compte répertorier comment le processus d'acquisition de ces technologies (identification du besoin, conception et installation) fut vécu et quantifier l'opération, la rentabilité et l'impact énergétique (énergie, puissance, émissions de GES évitées) de ces technologies.

Nous recherchons donc des commissions scolaires (CS) qui possèdent les technologies visées par l'étude de même que celles qui auraient considéré la possibilité d'installer du stockage thermique, sans que la solution ne soit finalement retenue. Votre participation au projet ne nécessitera aucun engagement financier de votre commission scolaire.

Pour optimiser les efforts déployés par les participants à l'étude et ainsi alléger leur implication dans le projet, nous demandons aux CS de permettre à quelques membres de l'équipe de projet de pouvoir accéder aux données contenues dans les systèmes suivants :

1. SIMACS ;
2. Banque des immeubles des commissions scolaires (BICS) ;
3. Hélios ;
4. Profil de consommation électrique¹.

Certains des participants seront retenus pour la phase d'étude détaillée. Dans ce cas, l'équipe de recherche effectuera alors une entrevue avec le/la chargé(e) de projet, et une visite des installations. Un accès aux documents d'archives du projet de rénovation, durant lequel le stockage thermique fut installé (plans et devis, coûts du projet, etc.) sera nécessaire à cette phase de l'étude.

Le rapport final du projet sera transmis à Transition énergétique Québec et sera rendu accessible à l'ensemble du réseau des commissions scolaires.

¹ En répondant favorablement au présent Appel à participer, la CS autorise Hydro-Québec à fournir les données détaillées de consommation d'énergie des bâtiments qu'elle soumettra à l'étude.

L'équipe de recherche s'engage à ne pas divulguer, diffuser ou publier tout renseignement personnel porté à sa connaissance durant cette étude. Bien que les données recueillies dans le cadre de l'étude puissent être utilisées pour d'autres fins de recherche, elles ne pourront être divulguées, diffusées ou publiées sans l'accord de Transition énergétique Québec et/ou du MEES, selon le cas.

Si cet Appel à participer à ce projet de recherche vous intéresse, veuillez me contacter : katherine.davignon@etsmtl.ca.

Dans l'attente d'une réponse favorable, veuillez recevoir mes sincères salutations.



Katherine D'Avignon, ing., PhD
Professeure
Département de génie de la construction
École de technologie supérieure

ANNEXE 2 – Fiche synthèse – Entretien préventif

Cette fiche synthétise les recommandations relatives à l'entretien préventif basées sur l'expérience vécue par les opérateurs interrogés dans le cadre du projet de recherche.

Une fois par année, lorsque l'ATC n'est pas en marche, les actions suivantes sont recommandées :

- Moteur de ventilateur :
 - Inspecter son état général et noter s'il y a apparence de surchauffe.
 - Resserrer les éléments de fixation, au besoin.
 - Nettoyer le moteur, l'hélice du ventilateur et la zone proche de ceux-ci pour retirer la poussière, la graisse et les saletés.
 - Lubrifier le moteur, au besoin.
 - Tester le condensateur. La capacitance nominale spécifiée par le fabricant est de 4 µF. Noter la valeur mesurée et remplacer, au besoin.
 - Mesurer la résistance électrique du bobinage du moteur. La résistance électrique devrait être de l'ordre de 15-25 Ω environ. Noter la valeur.
 - Vérifier l'état des câbles et des terminaisons des connexions électriques du moteur.
- Panneau électrique et panneau SSR :
 - Resserrer les connexions électriques.
 - Inspecter l'état des câbles, des relais électromécaniques, des relais à semiconducteurs (SSR) et des disjoncteurs.
 - Inspecter et tester la continuité électrique des fusibles. Remplacer au besoin.
 - Mesurer la résistance électrique des éléments chauffants pour s'assurer que le circuit électrique n'est pas ouvert. Comparer aux valeurs nominales de résistance présentées au Tableau A-15. Pour une vérification plus approfondie, suivre la procédure recommandée par le fabricant, décrite à la page suivante.
- Pompe :
 - Nettoyer les tamis.
 - Vérifier l'état de lubrification et d'étanchéité des joints.

Après le démarrage de l'ATC pour la saison de chauffage, il est recommandé de poser les actions suivantes :

- Moteur de ventilateur et pompe :
 - Vérifier le démarrage du ventilateur et de la pompe pendant la décharge.
- Panneau électrique et panneau SSR :
 - Utiliser un détecteur infrarouge (p. ex : caméra thermique ou thermomètre infrarouge) pour identifier les points chauds dans les panneaux. Au besoin, couper l'alimentation électrique et resserrer les connexions électriques.
- Sondes de température des briques :
 - Vérifier les valeurs affichées par le BMS des sondes de température des briques pendant la charge, la décharge et les périodes sans charge/décharge. Noter tout écart de plus de 100°C qui persiste entre les sondes.
 - Pour une vérification plus approfondie, le voltage des thermocouples peut être mesuré et comparé aux valeurs affichées par l'accumulateur aux canaux L137 à 139. Les voltages mesurés devraient être proches des valeurs spécifiées par le fabricant et répertoriées dans le Tableau A-13.

Tableau A-13 : Voltages attendus des thermocouples dans les noyaux de briques

Température (°F / °C)	Voltage (mV)
200 / 93	3,8
700 / 371	15,2
1 200 / 649	27,0

Remplacements de composants à prévoir :

L'expérience vécue par les participants utilisant l'ATC comme source principale de chauffage, indique que le remplacement de ces composants serait à prévoir après approximativement 2 à 3 années d'opération :

- Moteur de ventilateur (500-1 000\$)
- Condensateur du moteur de ventilateur (10\$)
- Fusibles (coût n.d.)

Recommandations d'entretien préventif annuel du fabricant :

Dans la plus récente version du manuel d'utilisation et d'installation (Steffes, 2020), le fabricant recommande d'effectuer annuellement les vérifications suivantes qui sont étroitement liées à l'expérience vécue des participants ayant pris part au projet de recherche.

I. Température maximale autorisée des briques :

Vérifier la valeur du canal de configuration L040. La valeur par défaut est 827°C et le fabricant indique de ne pas utiliser une température supérieure à cette valeur (Steffes b, 2020). Le fabricant suggère 760°C pour une utilisation comme source principale de chauffage et 704°C pour une utilisation comme outil de gestion de pointe. Réduire cette valeur peut augmenter la durée de vie des éléments chauffants (Steffes, s.d.).

II. Éléments chauffants :

Vérifier l'état des éléments chauffants en suivant la procédure proposée par le fabricant :

1. Demander la charge complète de l'ATC par le panneau de contrôle. Tous les éléments chauffants seront activés. Les précautions nécessaires doivent être prises avec le gestionnaire de bâtiment pour évaluer la possibilité et l'impact de dépasser l'appel de puissance maximale autorisée pour le mois en cours. Le nombre d'éléments actifs dans chaque noyau sera indiqué sur le panneau d'affichage de l'accumulateur, aux canaux L147 à L149 et peut être communiqué via BACnet au BMS.
2. Mesurer le courant électrique appelé par l'accumulateur entre chacune des phases. Noter la valeur et la comparer à la valeur nominale spécifiée dans la fiche technique (Steffes c, 2020) et présentée au Tableau A-14.

Tableau A-14: Courant appelé par les éléments chauffants lors de la charge des trois noyaux de briques

Modèle	Alimentation électrique (V)	Courant appelé (A)
9150	120/240	128,44
	347/600	51,23
9180	120/240	192,66
	347/600	76,84

3. Attendre que le niveau de charge de l'ATC ait atteint 100% et vérifier que son état change sur le panneau d'affichage, passant de « tL : F » à « tL : _ ».
4. Mesurer à nouveau le courant électrique appelé pour s'assurer qu'il soit nul maintenant que les noyaux ont atteint leur point de consigne.
5. Couper l'alimentation électrique de l'accumulateur.
6. Retirer le panneau extérieur qui donne accès aux éléments chauffants.
7. Soulever la couverture isolante. Le fabricant suggère d'utiliser une feuille de métal ou de carton rigide d'environ 34 po X 20 po et d'y attacher la couverture isolante avant de la soulever (Steffes, 2016). Si elle se désagrège, prévoir son remplacement. Une décoloration ou des taches noires sur la face visible du panneau isolant rigide peuvent indiquer que des éléments chauffants ne fonctionnent plus. Ne pas décoller le panneau isolant rigide des briques pour éviter d'endommager les éléments chauffants.
8. Mesurer la résistance électrique des éléments pour s'assurer que le circuit électrique n'est pas ouvert. Les éléments devraient être considérés défectueux si l'écart entre la résistance mesurée et la résistance nominale est supérieur à $\pm 5\%$ (Steffes, 2016). Les plages attendues de résistance électrique (Steffes, 2016) sont présentées dans le Tableau A-15. Noter la présence d'éléments défectueux et leur noyau (haut, milieu, bas).

Tableau A-15: Résistance électrique attendue des éléments chauffants

Puissance nominale (kW)	Alimentation électrique (V)	Résistance électrique (Ω)		
		Minimale	Nominale	Maximale
4,444	347	25,74	27,10	28,44
4,444	240	12,30	12,96	13,60

9. Remettre le panneau en place et rétablir l'alimentation électrique de l'accumulateur.

III. Sondes de température des briques :

Vérifier que les sondes de température sont insérées complètement dans les briques. Cette vérification peut être faite en même temps que celle des éléments chauffants décrite précédemment.

D'autres vérifications préventives annuelles sont recommandées par le fabricant (annexe A.09 de (Steffes, 2020)) et devraient être considérées comme de bonnes pratiques de maintenance à adopter.

ANNEXE 3 – Fiche synthèse – Performance des sites

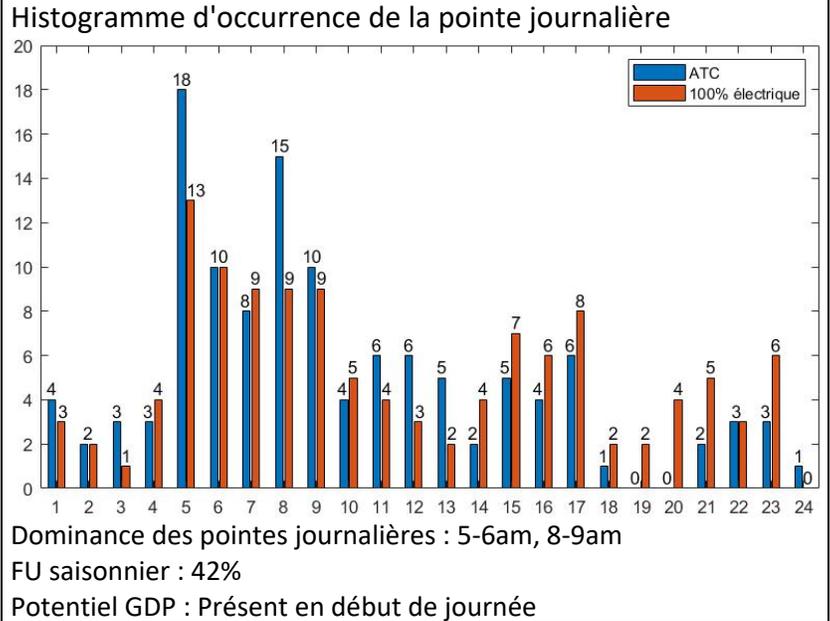
Site 1	p. 74
Site 2	p. 75
Site 3	p. 76
Site 4	p. 77
Site 5	p. 78
Site 6	p. 79
Site 7	p. 80
Site 8	p. 81
Site 9	p. 82
Site 10	p. 83
Site 11	p. 84
Site 12	p. 85
Site 13	p. 86
Site 14	p. 87
Site 15	p. 88
Site 16	p. 89
Site 17	p. 90
Site 18	p. 91

Fiche synthèse – Site #1

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1952
Superficie occupée	1438 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChMaz
après	1 ChProp
Année d'installation ATC	2017
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	M0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment



Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
 Sources de chauffage : ATC, Auxiliaire fonctionnant au combustible
 Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.
 Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.
 Fin de semaine : Sans distinction.
 Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1
Facturation	11 500\$	14 000\$	Énergie fournie	42 700 kWh
GES émis	1 t. éq. CO ₂	1 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	54 600 kWh
Pointe	89 kW	140 kW	Pertes thermiques	10 600 kWh
saisonnaire	1am	1pm	Rendement	78%

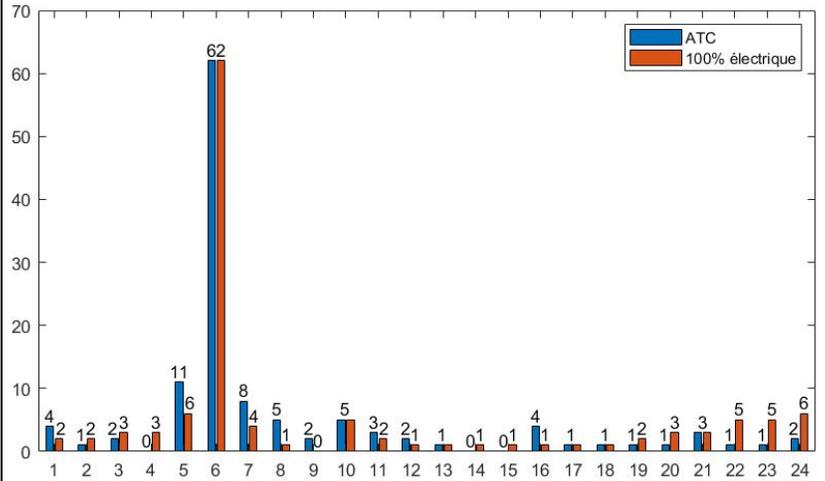
Fiche synthèse – Site #2

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1955
Superficie occupée	901 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChMaz
après	Aucune
Année d'installation ATC	2016
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	M0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5-6am

FU saisonnier : 41%

Potentiel GPD : Fort potentiel en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, sans source auxiliaire.

Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1
Facturation	6 800\$	8 300\$	Énergie fournie	33 400 kWh
GES émis	0,1 t. éq. CO ₂	0,1 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	47 400 kWh
Pointe	57 kW	101 kW	Pertes thermiques	12 700 kWh
saisonnaire	6am	11pm	Rendement	70%

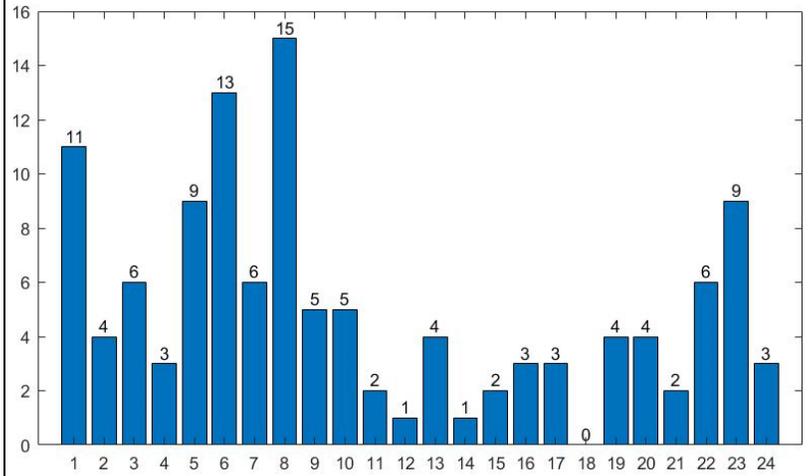
Fiche synthèse – Site #3

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montréal
Année de construction	1951
Superficie occupée	4 201 m ²
Sources thermiques, avant	2 ChMaz, 1 ChElec
après	1 ChProp
Année d'installation ATC	2016
Nombre et modèles	2 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	M0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarification HQ, avant	2 compteurs, tarif G
après	2 compteurs, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 1, 6, 8am

FU saisonnier : 65%

Potentiel GPD : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Auxiliaire fonctionnant au combustible

Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle - Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévission journalière de T_{ext}

	Scénario ATC
Facturation	29 300\$
GES émis	0,5 t. éq. CO ₂
Pointe	152 kW
saisonnaire	1am

	ATC1	ATC2
Énergie fournie	75 000 kWh	110 300 kWh
Énergie consommée	87 400 kWh	126 000 kWh
Pertes thermiques	10 600 kWh	6 100 kWh
Rendement	86%	88%

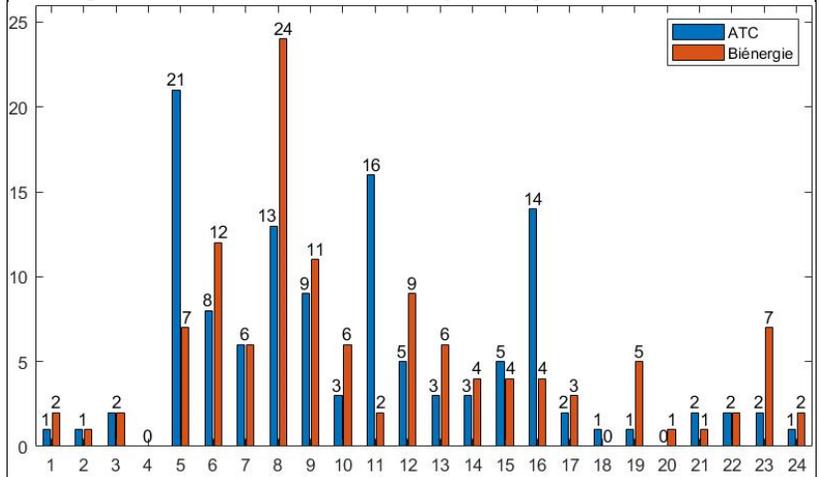
Fiche synthèse – Site #4

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1971
Superficie occupée	4402 m ²
Sources thermiques, avant	2 ChMaz
après	1 ChProp
Année d'installation ATC	2016
Nombre et modèles	3 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	MV0
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarification HQ, avant	2 compteurs, tarif G
après	2 compteurs, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5am

FU saisonnier : 62%

Potentiel GPD : Faible

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
+ Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)

Sources de chauffage : ATC, Auxiliaire fonctionnant au combustible

Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario biénergie		ATC1	ATC2	ATC3
Facturation	23 500\$	24 900\$	Énergie fournie	50 100 kWh	58 500 kWh	73 400 kWh
GES émis	0,4 t. éq. CO ₂	22 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	57 900 kWh	67 900 kWh	82 400 kWh
Pointe	157 kW,	162 kW,	Pertes saisonnières	8 500 kWh	8 400 kWh	8 000 kWh
saisonnière	9am	8am	Rendement	86%	86%	89%

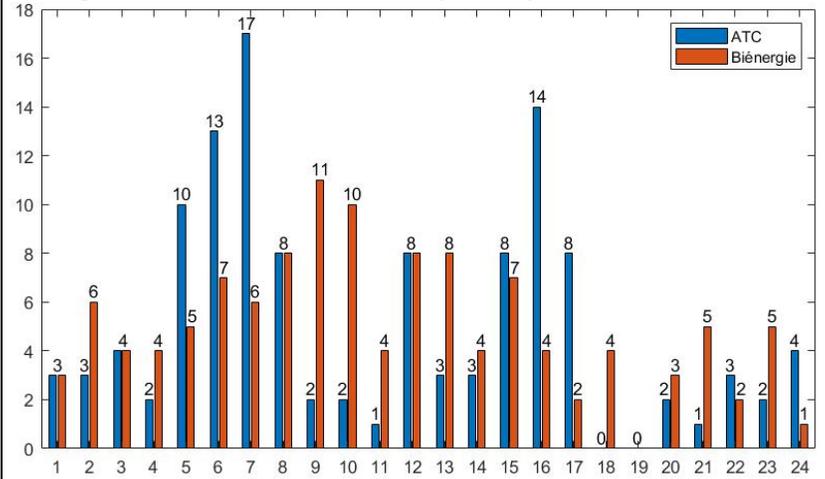
Fiche synthèse – Site #5

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1971
Superficie occupée	3904 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChElec, 1 ChMaz
après	1 ChProp, 1 ChElec
Année d'installation ATC	2015
Nombre et modèles	2 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	MV0
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5-7am, 4pm

FU saisonnier : 52%

Potentiel GPD : Présent en début et fin de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
+ Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique, Auxiliaire fonctionnant au combustible

Source principale : Électricité (chaudière + ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale (ATC1) et Gestion de pointe (ATC2)

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario biénergie		ATC1	ATC2
Facturation	21 200\$	22 300\$	Énergie fournie	122 700 kWh	23 000 kWh
GES émis	2 t. éq. CO ₂	38 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	139 900 kWh	31 400 kWh
Pointe	157 kW	122 kW	Pertes thermiques	10 300 kWh	11 200 kWh
saisonnaire	4pm	9am	Rendement	88%	73%

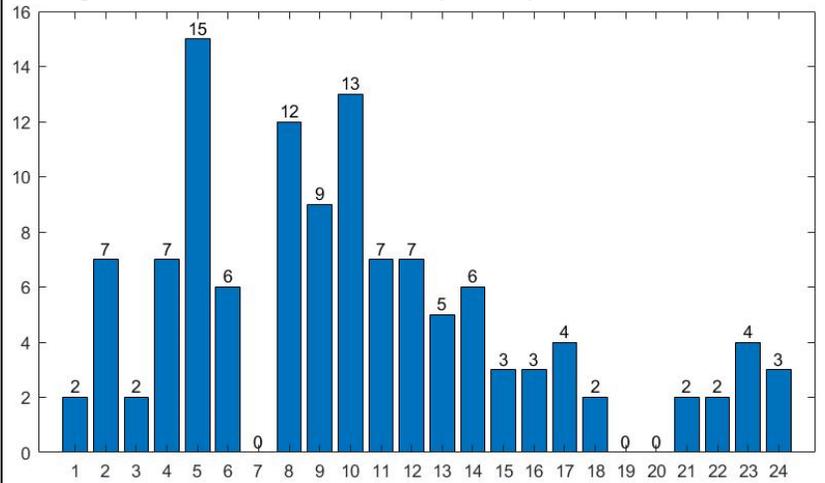
Fiche synthèse – Site #6

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1956
Superficie occupée	3600 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChMaz
après	Aucune
Année d'installation ATC	2017
Nombre et modèles	2 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	MV0
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif M
après	1 compteur, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5, 8-10am

FU saisonnier : 61%

Potentiel GPD : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
+ Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)

Sources de chauffage : ATC, sans source auxiliaire.

Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC
Facturation	23 000\$
GES émis	0,4 t. éq. CO ₂
Pointe	155 kW
saisonnaire	9am

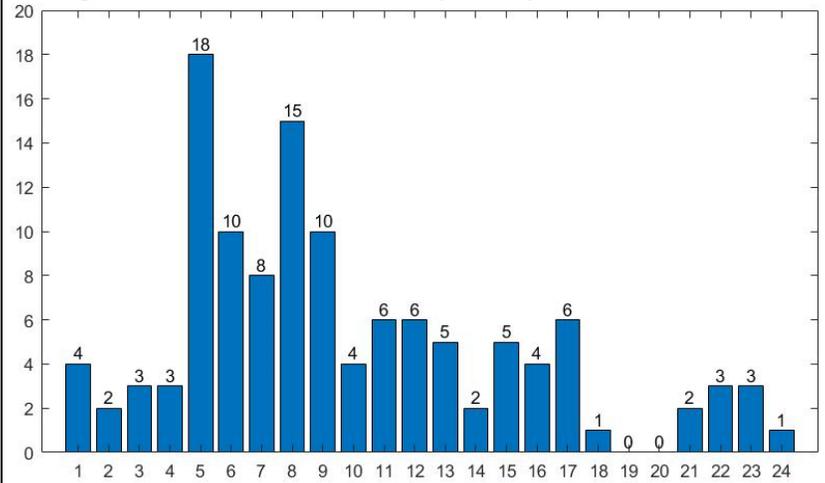
Fiche synthèse – Site #7

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Montérégie
Année de construction	1956
Superficie occupée	1 633 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChMaz
après	Géothermie, 1 ChProp
Année d'installation ATC	2019
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	EVO
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4133
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5-6, 8-9am

FU saisonnier : 46%

Potentiel GPD : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Auxiliaire fonctionnant au combustible

Source principale : Électricité (ATC).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

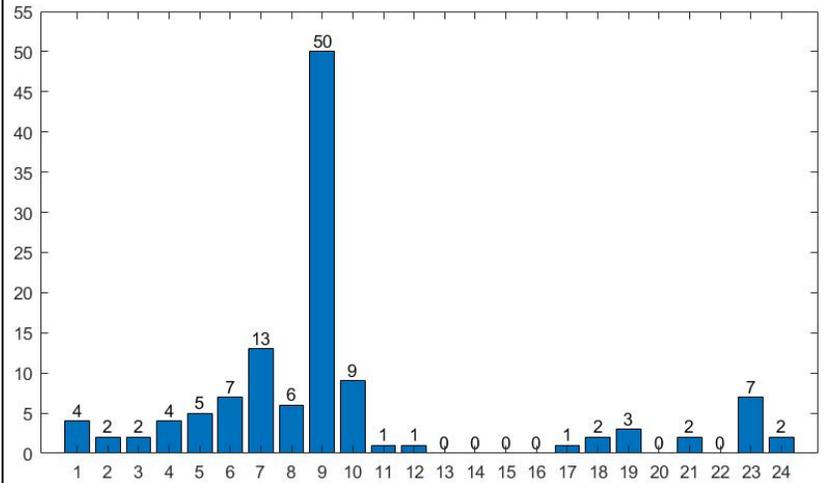
Fiche synthèse – Site #8

Caractéristiques générales

Vocation	Secondaire
Région	Laurentides
Année de construction	1964
Superficie occupée	24 074 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChEauGazNat
après	1 ChEauGazNat
Année d'installation ATC	2010
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	GC1
après	EC1
Degré-jours de chauffage, année normale	3931
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Pointe saisonnière du bâtiment : 1109 kW, 9am

Dominance des pointes journalières : 6, 9-10am

FU moyen : 54%

Potentiel GPD : Fort potentiel en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Réseau d'eau chaude domestique (« ECD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière fonctionnant au combustible (réseau ECD).

Source principale : Combustible (gaz naturel).

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.Mise à l'arrêt lorsque l'accumulateur ne peut maintenir $> 5^{\circ}\text{C}$ entre son entrée et sortie.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

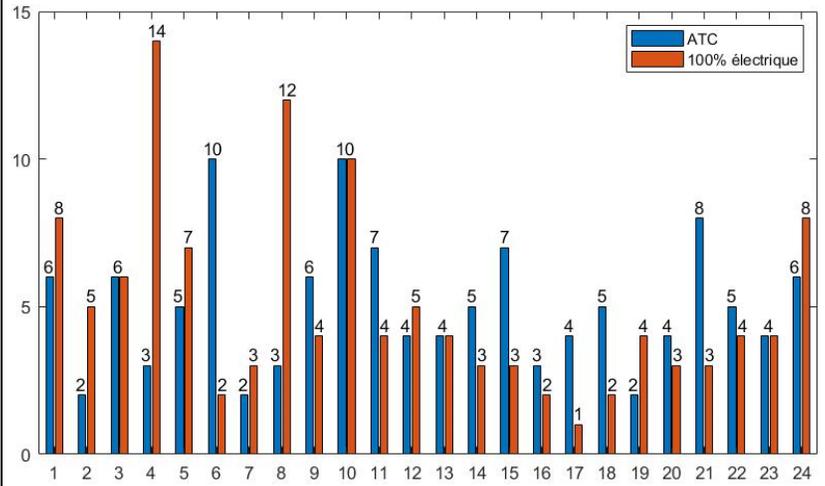
Fiche synthèse – Site #9

Caractéristiques générales

Vocation	Secondaire
Région	Laurentides
Année de construction	1951
Superficie occupée	7 742 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChElect, 2 ChGazNat
après	1 ChElect, 2 ChGazNat
Année d'installation ATC	2008
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	E1
après	E1
Degré-jours de chauffage, année normale	3931
Tarification HQ, avant	2 compteurs, tarif G
après	1 compteur, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 6am, 10am

FU moyen : 86%

Potential GPD : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique, Chaudière au combustible

Source principale : Électricité (chaudière).

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1
Facturation	50 800\$	48 900\$	Énergie fournie	62 200 kWh
GES émis	58 t. éq. CO ₂	58 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	75 000 kWh
Pointe	212 kW	249 kW	Pertes thermiques	9 900 kWh
saisonnière	0am	2pm	Rendement	83%

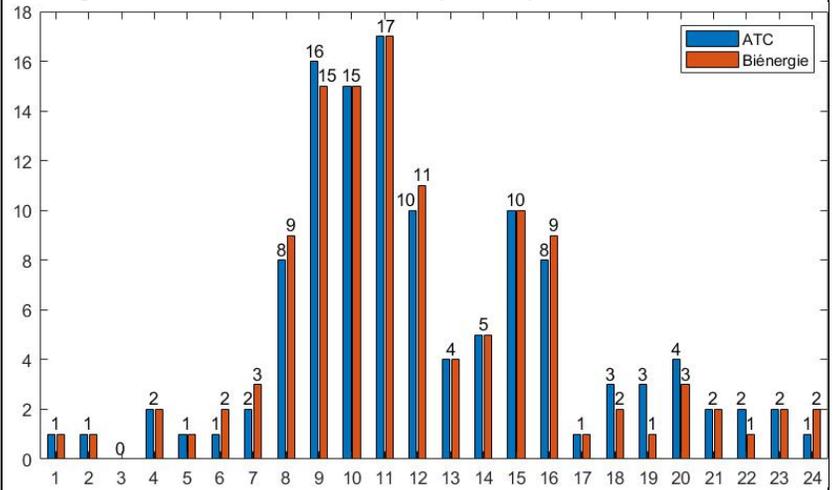
Fiche synthèse – Site #10

Caractéristiques générales

Vocation	Secondaire
Région	Chaudière-Appalaches
Année de construction	1961
Superficie occupée	34 262 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChElec, 2 ChMaz
après	1 ChElec, 1 ChMaz
Année d'installation ATC	2015
Nombre et modèles	3 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	EV2
après	EV2
Degré-jours de chauffage, année normale	4533
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif M
après	1 compteur, tarif M

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 9am-12, 3-4pm

FU saisonnier : 68%

Potentiel GPD : Présent en début de journée

Configuration du réseau

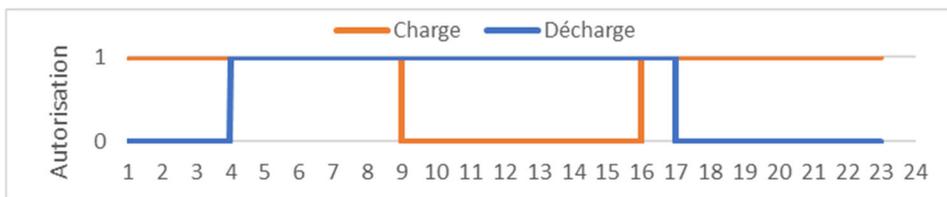
Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
 + Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)
 + Réseau d'eau chaude domestique (« ECD »).

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique, Chaudière au combustible

Source principale : Électricité (chaudière).

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Déplacement de charge



Cycle de charge-décharge quotidien.
 Autorisation de charge hors occupation seulement.
 Autorisation de décharge de jour.
 Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Aucune décharge entre vendredi 4pm et lundi 4am.

Aucune recharge entre vendredi 7pm et dimanche 4pm.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario biénergie		ATC1	ATC2	ATC3
Facturation	160 350\$	160 100\$	Énergie fournie	19 850 kWh	22 600 kWh	20 700 kWh
GES émis	15 t. éq. CO ₂	28 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	25 200 kWh	26 900 kWh	28 200 kWh
Pointe	1134 kW	1134 kW	Pertes saisonnières	6 900 kWh	6 400 kWh	6 400 kWh
saisonnaire	9am	9am	Rendement	79%	84%	73%

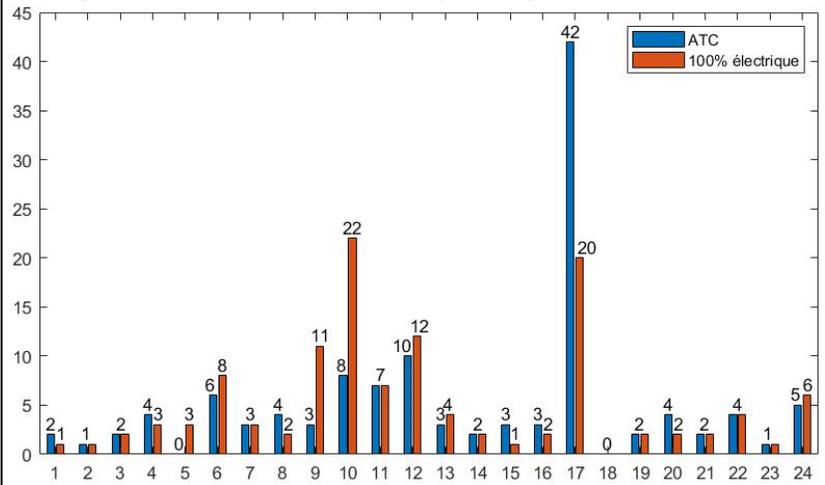
Fiche synthèse – Site #11

Caractéristiques générales

Vocation	Secondaire
Région	Chaudière-Appalaches
Année de construction	1947
Superficie occupée	18 628 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChElec, 2 ChMaz
après	1 ChElec, 1 ChMaz
Année d'installation ATC	2015
Nombre et modèles	2 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	EV2
après	EV2
Degré-jours de chauffage, année normale	4533
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif M
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5pm

FU saisonnier : 55%

Potentiel GPD : Fort en fin de journée

Configuration du réseau

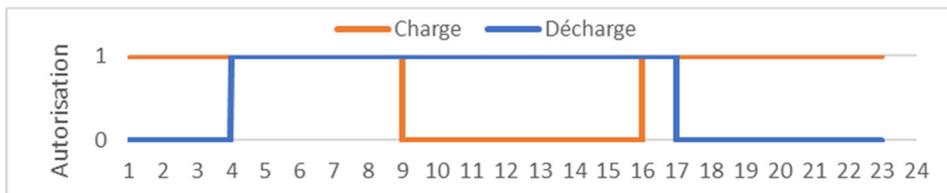
Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
+ Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique, Chaudière au combustible

Source principale : Combustible (gaz naturel).

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Déplacement de charge



Cycle de charge-décharge quotidien.
Autorisation de charge hors occupation seulement.
Autorisation de décharge de jour.
Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Aucune décharge entre vendredi 4pm et lundi 4am.

Aucune recharge entre vendredi 7pm et dimanche 4pm.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

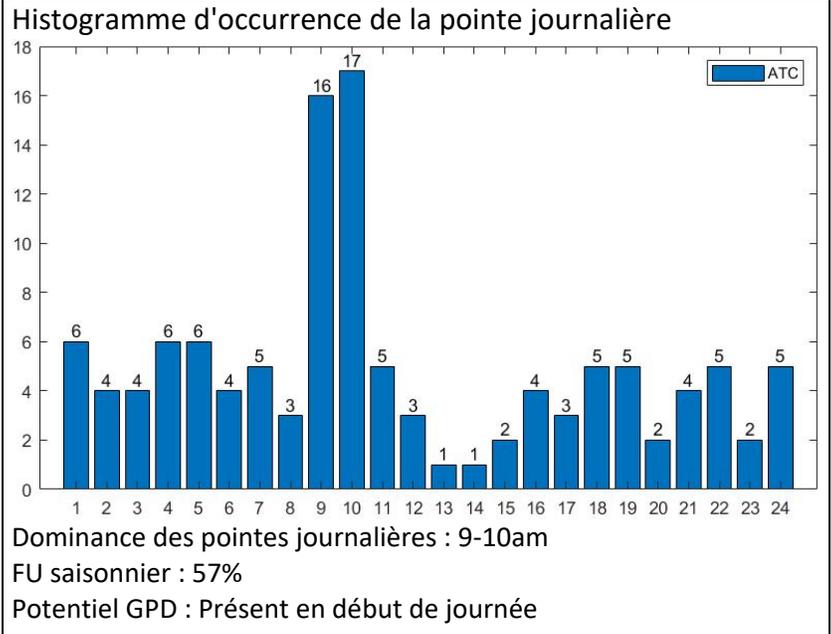
	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1	ATC2
Facturation	71 800\$	72 550\$	Énergie fournie	1 400 kWh	10 200 kWh
GES émis	114 t. éq. CO ₂	114 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	2 400 kWh	15 500 kWh
Pointe	359 kW	378 kW	Pertes thermiques	1 200 kWh	6 300 kWh
saisonnaire	4pm	9am	Rendement	58%	66%

Fiche synthèse – Site #12

Caractéristiques générales

Vocation	Secondaire
Région	Bas-Saint-Laurent
Année de construction	1957
Superficie occupée	5 786 m ²
Sources thermiques, avant	2 ChElec
après	2 ChElec
Année d'installation ATC	2017
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	E0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4966
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif M
	1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M
	1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment



Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique

Source principale : Électricité (chaudière).

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

	Scénario ATC		ATC1
Facturation	36 850\$	Énergie fournie	~0 kWh
GES émis	0.6 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	6 700 kWh
Pointe	220 kW	Pertes thermiques	6 700 kWh
saisonnaire	9am	Rendement	0%

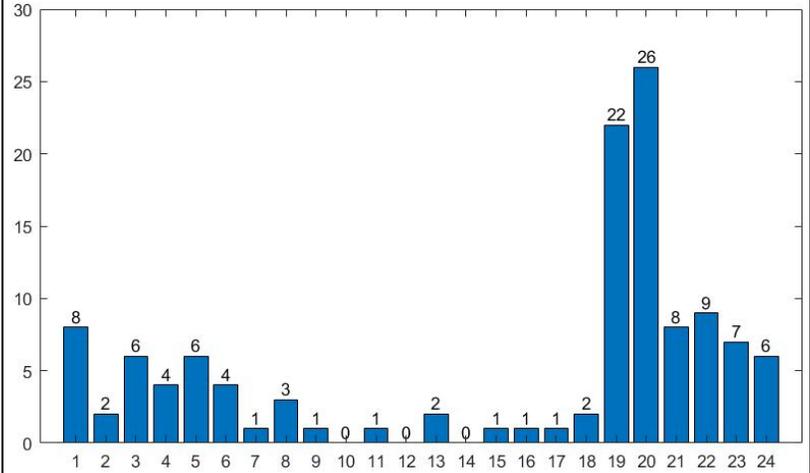
Fiche synthèse – Site #13

Caractéristiques générales

Vocation	Présoilaire et primaire
Région	Bas-Saint-Laurent
Année de construction	1988
Superficie occupée	4 413 m ²
Sources thermiques, avant	1 ChElec, 1 ChMaz
après	2 ChElec
Année d'installation ATC	2020
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	E0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4966
Tarifcation HQ, avant	2 compteurs, tarif M
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 7-8pm

FU saisonnier : 55%

Potentiel GPD : Fort potentiel en fin de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
+ Chauffage ou préchauffage de l'air extérieur (« OA »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique

Source principale : Électricité

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Autorisation de décharge : Entre 7am et 6pm quotidiennement, avec modulation selon besoins. Exceptionnellement, la décharge peut avoir lieu hors de cette plage si la chaudière électrique ne suffit pas à atteindre la consigne de la boucle.

Fin de semaine : Sans distinction (recharge et décharge autorisées).

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

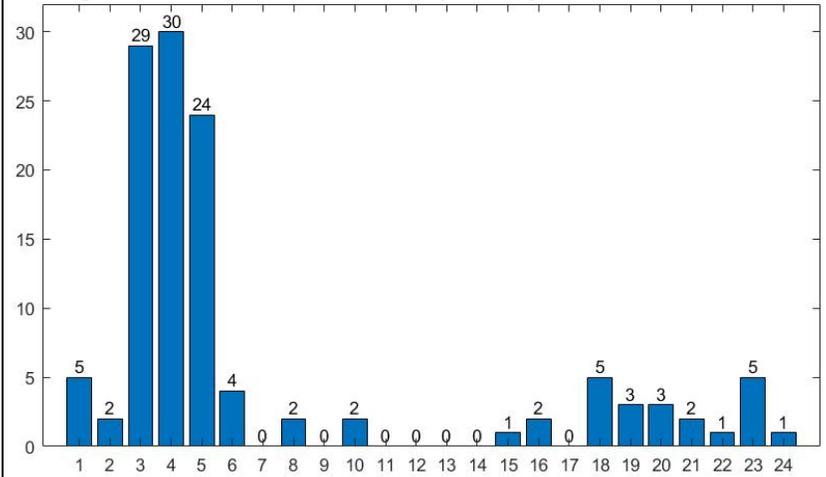
Fiche synthèse – Site #14

Caractéristiques générales

Vocation	Précolaire et primaire
Région	Bas-Saint-Laurent
Année de construction	1957
Superficie occupée	3 303 m ²
Sources thermiques, avant	ChMaz
après	2 ChElec
Année d'installation ATC	2016
Nombre et modèles	2 unités, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	E0
après	E0
Degré-jours de chauffage, année normale	4966
Tarification HQ, avant	4 compteurs, tarif G
après	3 compteurs, tarif G 1 compteur, tarif G9

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 3-5am

FU saisonnier : 42%

Potentiel GDP : Faible

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique

Source principale : Électricité

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Mesure instantanée de T_{ext}

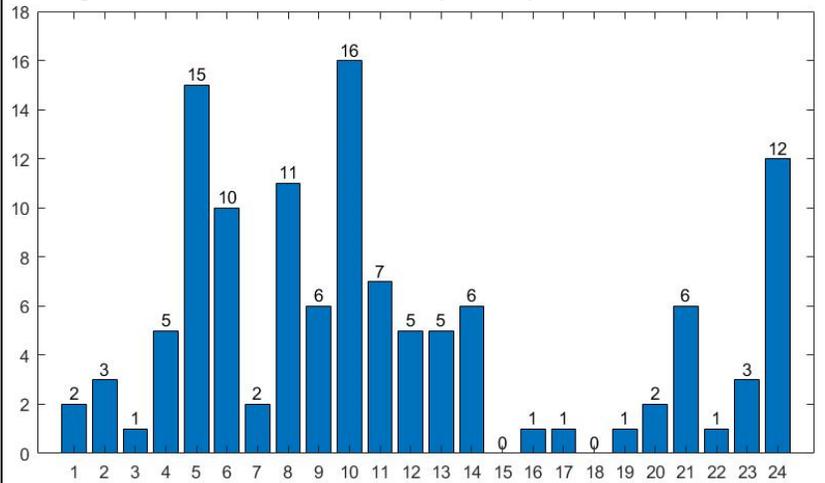
Fiche synthèse – Site #15

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Lanaudière
Année de construction	1954
Superficie occupée	2 822 m ²
Sources thermiques, avant	ChElec, ChMaz
après	ChElec
Année d'installation ATC	2008
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	EVO
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4342
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 5 6am, 8-10am

FU moyen : 66%

Potentiel GDP : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique

Source principale : Électricité.

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Recharge réduite hors occupation, via température de consigne des briques.

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

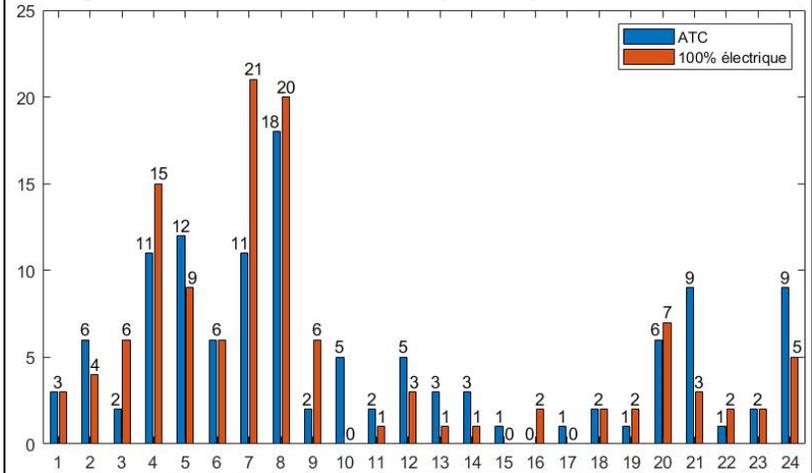
Fiche synthèse – Site #16

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Lanaudière
Année de construction	1951
Superficie occupée	3 704 m ²
Sources thermiques, avant	ChElec, ChMaz
après	ChElec
Année d'installation ATC	2008
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9180
Classification MEES, avant	EVO
après	EVO
Degré-jours de chauffage, année normale	4342
Tarifcation HQ, avant	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 4-5am, 7-8am
 FU saisonnier : 47%
 Potentiel GDP : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
 Sources de chauffage : ATC, Chaudière électrique
 Source principale : Électricité

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.
 Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

Fin de semaine : Sans distinction

Température de consigne des briques : Prévision journalière de T_{ext}

	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1	
Facturation	18 400\$	20 600\$	Énergie fournie	56 300 kWh	
GES émis	0.3 t. éq. CO ₂	0.3 t. éq. CO ₂		Énergie consommée	63 000 kWh
Pointe	145 kW	213 kW		Pertes thermiques	4 650 kWh
Pointe saisonnière	8pm	2am		Rendement	89%

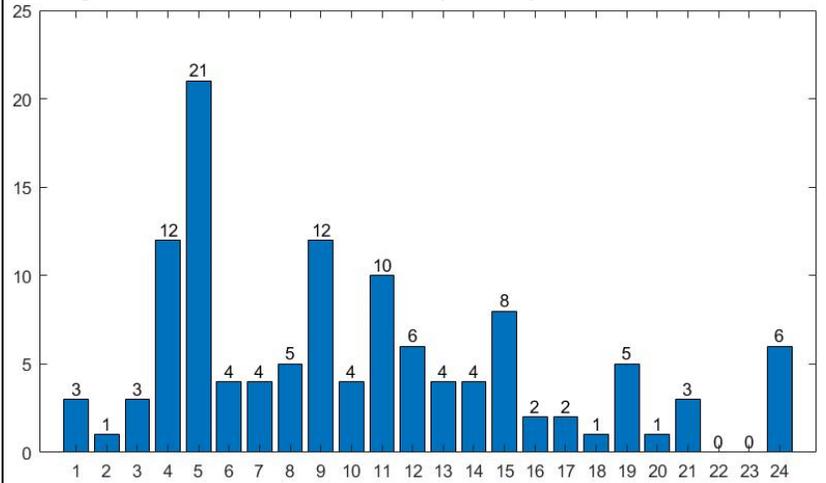
Fiche synthèse – Site #17

Caractéristiques générales

Vocation	Primaire
Région	Saguenay-Lac-Saint-Jean
Année de construction	1962
Superficie occupée	2 356 m ²
Sources thermiques, avant	ChElec, ChMaz
après	ChElec, ChMaz
Année d'installation ATC	2013
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9150
Classification MEES, avant	MV0
après	n.d.
Degré-jours de chauffage, année normale	4509
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G
après	1 compteur, tarif M 1 compteur, tarif G

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Histogramme d'occurrence de la pointe journalière



Dominance des pointes journalières : 4-5am, 9am

FU moyen : 43%

Potentiel GDP : Présent en début de journée

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)

Sources de chauffage : ATC, Chaudière au combustible

Source principale : Combustible (mazout).

Fonction de l'ATC : Gestion de pointe

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.

Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.

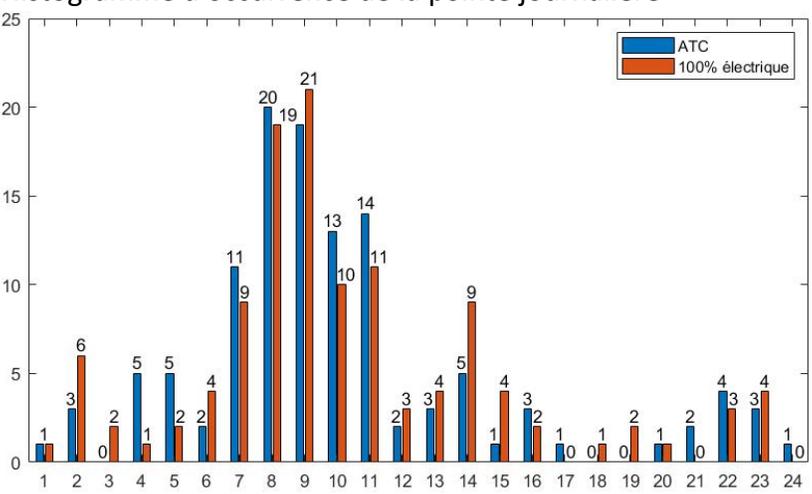
Fin de semaine : Sans distinction.

Température de consigne des briques : Consigne mensuelle

Fiche synthèse – Site #18

Caractéristiques générales

Analyse de l'appel de puissance du bâtiment

Vocation	Primaire	Histogramme d'occurrence de la pointe journalière 	
Région	Saguenay-Lac-Saint-Jean		
Année de construction	1957		
Superficie occupée	2 242 m ²		
Sources thermiques, avant	ChElec, ChMaz		
après	ChElec, ChMaz		
Année d'installation ATC	2013		
Nombre et modèles	1 unité, ThermElect 9150		
Classification MEES, avant	M0		
après	n.d.		
Degré-jours de chauffage, année normale	4509**		
Tarification HQ, avant	1 compteur, tarif M		Dominance des pointes journalières : 7-11am FU saisonnier : 73% Potentiel GDP : Présent en début de journée
après	1 compteur, tarif M		

Configuration du réseau

Besoin desservi : Chauffage des espaces par des appareils hydroniques locaux tels des radiateurs (« RAD »)
 Sources de chauffage : ATC, Chaudière au combustible
 Source principale : ATC.

Fonction de l'ATC : Source principale

Stratégie de contrôle : Nivelage de charge

Nivelage de charge : Aucun cycle marqué de charge-décharge. Autorisation de charge et décharge en tout temps.
 Modulation pour écrêtage avec P_{max} mensuelle.
 Fin de semaine : Sans distinction.
 Température de consigne des briques : Consigne mensuelle

	Scénario ATC	Scénario 100% électrique		ATC1
Facturation	14 700\$	16 300\$	Énergie fournie	82 400 kWh
GES émis	11 t. éq. CO ₂	11 t. éq. CO ₂	Énergie consommée	86 000 kWh
Pointe	62 kW	92 kW	Pertes thermiques	4 400 kWh
saisonnaire	9am	8am	Rendement	96%