

Faciliter la mise en œuvre de l'accumulateur thermique
électrique centralisé pour la gestion de la demande et la
décarbonation du chauffage des bâtiments institutionnels

par

Vincent CHABOT

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

MONTREAL, LE 25 AVRIL 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Vincent Chabot, 2023



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

Mme Lyne Woodward, présidente du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 12 AVRIL 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Clore la maîtrise, après maints hauts et bas que la recherche et la vie m'ont amenés et appris, n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier sincèrement. Tout d'abord, je remercie Pr Katherine D'Avignon pour son soutien, aussi bien académique, professionnel, personnel que financier. Tes conseils, ta rigueur, ton écoute et ta *passion contagieuse* pour la recherche ont fait de la maîtrise une expérience fort enrichissante. Aussi, je remercie du fond du cœur ma famille, aussi serrée soit-elle, ainsi que mes amis proches, qui m'ont donné tout le soutien nécessaire. Je vous en suis très reconnaissant.

Pour leur collaboration et le partage des connaissances, je remercie mes collègues du groupe de recherche sur l'ATC : Milena B., Julien C., Sullivan D., Julien D., Rabah G., Eyé Imelda I., Maxime L., Abdelkrim M., Eve Patricia N. N. et Housseem Eddine Y. Pour leur compagnie et les amitiés développées, je remercie mes collègues du LTSB : Arnaud B., Hugo B., Robin C., Sophie C., Emeric D-B., Timothée L., Mathieu L., Elodie M., Timothée M., Arafah M., Paul P., Catherine St-P., Marie-Hélène T., Farah Y., Nour Y. et Junior Z. Je remercie aussi les Pr Didier H. et Danielle M. du LTSB pour leurs conseils et leur dynamisme, ainsi que Javier B.-G. et Michaël D. pour leur soutien technique quant aux mesures de débit. Pour avoir accepté de faire partie de mon jury, je remercie les Pr Katherine D., Didier H. et Lyne W.

Pour leur participation aux entrevues, je remercie le personnel des CSS, des firmes de génie-conseil, des ESE et de la SQI. Je remercie aussi le personnel des entreprises ayant extrait les données d'opération. Pour la rapidité de leurs réponses, je remercie le soutien technique de Steffes. Pour les opportunités de rédaction et de présentation, qui ont été source de motivation et qui m'ont permis de préciser ma maîtrise, je tiens à remercier Pr Katherine D. et l'équipe d'exemplarité de l'État du Bureau de la transition climatique et énergétique.

Enfin, pour l'octroi de la bourse d'études supérieures Alexander-Graham-Bell, je remercie le CRSNG ainsi que le comité d'examen CRSNG de l'ÉTS. Je remercie également Hydro-Québec et le comité de sélection interne de l'ÉTS pour l'octroi de la bourse Hydro-Québec.

Faciliter la mise en œuvre de l'accumulateur thermique électrique centralisé pour la gestion de la demande et la décarbonation du chauffage des bâtiments institutionnels

Vincent CHABOT

RÉSUMÉ

La transition énergétique des bâtiments est nécessaire pour lutter contre les changements climatiques. L'exemplarité de l'État, un engagement du gouvernement du Québec, au Canada, vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) du chauffage des bâtiments institutionnels. Au Québec, l'intensité des émissions de GES liées à la consommation d'électricité est relativement faible. L'électrification peut donc contribuer, dans une certaine mesure, à la décarbonation du chauffage. Cette transition présente plusieurs enjeux, dont celui de la gestion de la demande d'électricité, puisque le réseau de la province connaît déjà des périodes de demande élevée en hiver associée au chauffage. La transition énergétique du chauffage des bâtiments doit ainsi reposer sur différentes stratégies, dont des mesures de gestion de la demande telles que le stockage thermique. Un système de stockage thermique sensible, l'accumulateur thermique électrique centralisé (ATC), est offert sur le marché et adapté au chauffage hydronique de bâtiments institutionnels. Lorsque la demande le permet, l'ATC convertit de l'électricité en chaleur et la stocke dans des briques. Cette chaleur est ensuite extraite pour combler les besoins thermiques du bâtiment sans impacter significativement la demande d'électricité.

L'objectif principal de ce projet de recherche est de faciliter la mise en œuvre de l'ATC hydronique dans les bâtiments institutionnels, plus spécifiquement les Centres de services scolaires (CSS). La « mise en œuvre » englobe la conception, la mise en service, l'opération et la maintenance. Tant dans la littérature que dans l'industrie, des barrières à l'adoption du stockage thermique subsistent, d'où l'objectif d'en faciliter la mise en œuvre en proposant des moyens concrets de les surmonter.

Pour ce faire, la méthodologie employée est mixte : en partie qualitative et quantitative. La première partie, qualitative, consiste à identifier les défis relevés et les leçons apprises lors de la mise en œuvre passée d'ATC hydroniques à partir d'entrevues semi-dirigées avec des acteurs de l'industrie. La seconde partie, quantitative, consiste à quantifier la performance in situ d'ATC hydroniques à partir de données d'opération. Cette méthode mixte permet de porter un regard sur l'effet des pratiques actuelles de mise en œuvre sur la performance in situ, afin d'en dégager des bonnes pratiques à adopter. Parmi celles-ci, l'élaboration de séquences de contrôle détaillées lors de la conception joue un rôle crucial sur le déroulement de la mise en service et l'atteinte des bénéfices énergétiques, économiques et de réduction des émissions de GES. En effet, l'analyse de données d'opération a montré le fort lien entre la performance in situ, la robustesse des séquences de contrôle en place et le suivi de l'opération. L'analyse des entrevues a quant à elle exposé le défi de disposer de données suffisantes lors de la conception pour élaborer des séquences de contrôle détaillées, et ce, tant sur les besoins thermiques et la demande d'électricité d'un bâtiment existant, que sur l'ATC hydronique lui-même.

VIII

À partir des analyses des entrevues et des données d'opération, la troisième partie de ce projet de recherche consiste à proposer des solutions pour améliorer les pratiques et la performance actuelles. À ce titre, les données extraites des entrevues sur les composants remplacés de l'ATC hydronique ont été exploitées pour synthétiser les tâches de maintenance préventive à effectuer sous forme d'une fiche. Cette fiche vise à mieux planifier la maintenance et à éviter des modes d'opération dommageables pour ces composants, tout en tenant compte des ressources limitées à allouer à la maintenance. À partir de données d'opération d'ATC hydroniques (modèle de 80 kW_e), l'autodécharge a été caractérisée par le coefficient de déperditions thermiques effectif et la puissance thermique maximale pouvant être fournie a été quantifiée afin d'outiller l'élaboration de séquences de contrôle détaillées lors de la conception et le suivi de l'opération.

Pour poursuivre dans la même lignée que ce projet de recherche, il est recommandé de développer des outils plus automatisés facilitant la mise en œuvre de l'ATC hydronique, notamment : un outil simplifié d'estimation des impacts énergétiques, économiques et de réduction des émissions de GES pour appuyer l'analyse préliminaire de faisabilité technico-économique; un outil de modélisation énergétique pour faciliter l'élaboration de séquences de contrôle détaillées; ainsi qu'un outil permettant l'intégration à un système de détection et diagnostic de fautes et un système de gestion de l'énergie pour respectivement faciliter le suivi en continu de l'opération et de la performance. Finalement, l'analyse du partage des bénéfices entre consommateurs et services publics d'électricité, avec par exemple une offre tarifaire modifiée ou un programme de gestion de la demande incluant une stratégie de contrôle commune, serait à considérer afin de faciliter la mise en œuvre du stockage thermique électrique et d'accélérer la transition énergétique des bâtiments.

Mots clés : transition énergétique, stockage thermique électrique sensible, performance in situ, conception, opération, maintenance

Ease central electric thermal storage implementation for demand management and decarbonization of institutional buildings heating

Vincent CHABOT

ABSTRACT

An energy transition is required to face climate changes. A commitment from the government of the province of Quebec, in Canada, labelled as “l'exemplarité de l'État”, seek to reduce greenhouse gas (GHG) emissions of institutional building heating systems. In Quebec, the intensity of GHG emissions related to electricity consumption is relatively low. Electrification can thus contribute, in a certain way, to decarbonize heating. This transition presents numerous challenges, including electric demand management, since the province's grid already peaks during the winter due to heating. The energy transition of building heating systems must therefore include different strategies, including demand management measures such as thermal storage. A sensible thermal energy storage system, a central electric thermal storage (ETS) device, is commercially available and designed for hydronic heating of institutional buildings. When demand allows, the ETS device converts electricity into heat and stores it in bricks. Heat is then extracted to meet heating load without significant impact on electric demand.

The main objective of this research project is to ease implementation of this ETS hydronic device in institutional buildings, more specifically in educational facilities administered by school boards. “Implementation” comprises design, commissioning, operation, and maintenance stages. In the literature as well as in the industry, barriers to adoption of thermal storage remain, hence the objective of easing implementation by proposing concrete ways to overcome those barriers.

To do so, the methodology used is mixed: in part qualitative and quantitative. The first part, qualitative, is to identify challenges faced and lessons learned from past implementations of the ETS hydronic device using semi-structured interviews with various industry stakeholders. The second part, quantitative, is to quantify the in situ performance of ETS hydronic devices using building operational data. This mixed method allows analyzing the effect of actual implementation practices on in situ performance, in a way to highlight best practices to adopt. Among those, elaboration of detailed control sequences during design stage plays a crucial role in the commissioning process and in reaching energy, economic, and GHG emissions reduction benefits. Indeed, analysis of operational data demonstrated a strong connection between in situ performance, reliability of control sequences in place, and ETS device's operation tracking. On its hand, analysis of interviews outlined the challenge of having sufficient data at the design stage to develop detailed control sequences, even on heating and electric loads of existing buildings, and on the ETS hydronic device itself.

Based on the analyses of interviews and operational data, the third part of this research project is to propose solutions to improve actual practices and performance. Thus, data extracted from interviews on replaced ETS hydronic device's components were used to summarize preventive maintenance tasks to complete in a sheet. This summary sheet purposes are to better plan

maintenance actions and to avoid damageable operating modes for those components, while considering that allowable resources for maintenance are limited. Using operational data of ETS hydronic devices (80 kW_e model), self-discharge was characterized by the effective heat loss coefficient and maximum thermal power output was quantified, both to support the elaboration of detailed control sequences at the design stage and operation tracking.

To follow up on this research project, it is recommended to develop automated tools easing implementation of the ETS hydronic device, such as: a simplified estimation tool to assess energy, economic, and GHG emissions impacts to support preliminary technical and economical analyses; an energy modelling tool to ease elaboration of detailed control sequences; and a tool to integrate fault detection and diagnostics system and energy management system to ease continuous operation and performance tracking, respectively. Finally, an analysis of benefit shares between consumers and public electric utilities, with for example modified tariffs or a demand-side management program including a common control strategy, should be considered to ease implementation of electric thermal storage and fast forward the energy transition of buildings.

Key words: energy transition, sensible electric thermal storage, in situ performance, design, operation, maintenance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 Le stockage thermique	7
1.1.1 Maintenance	10
1.1.2 Mise en service et opération	11
1.1.3 Conception	16
1.2 L'accumulateur thermique électrique centralisé	18
1.2.1 Historique et installations existantes	19
1.2.2 Caractéristiques de l'ATC hydronique	22
1.2.2.1 Matériau de stockage	24
1.2.2.2 Isolation thermique	24
1.2.2.3 Éléments chauffants	25
1.2.2.4 Moteur du ventilateur	27
1.2.2.5 Échangeur de chaleur	28
1.2.2.6 Contrôleur et sondes de température	30
1.3 Mesurage de performance in situ	33
1.3.1 Mesures non invasives de débit d'eau	38
1.3.2 Puissance maximale appelée, déplacement et nivelage de la demande	41
1.3.3 Rendement énergétique	43
1.3.4 Pertes thermiques	46
1.3.5 Indicateurs statistiques	50
1.4 Synthèse de la revue de la littérature	51
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE GLOBALE DE RECHERCHE	53
CHAPITRE 3 DÉFIS À RELEVER ET LEÇONS APPRISSES EN LIEN AVEC LES PRATIQUES ACTUELLES DE MISE EN ŒUVRE D'ATC	57
3.1 Défis potentiels de mise en œuvre tirés de la revue de la littérature	59
3.2 Méthode de collecte et d'analyse des données	61
3.2.1 Étape 1 : Définir les thématiques à aborder	61
3.2.2 Étape 2 : Identifier les candidats potentiels et recruter	62
3.2.3 Étape 3 : Élaborer les questionnaires	64
3.2.4 Étape 4 : Mener les entrevues	66
3.2.5 Étape 5 : Structurer l'information	67
3.2.6 Étape 6 : Analyser les données	68
3.3 Résultats de l'analyse des données extraites des entrevues	72
3.3.1 Opération	72
3.3.1.1 Mise en service	74
3.3.1.2 Suivi de l'opération	77
3.3.1.3 Suivi de la performance	80
3.3.2 Maintenance	81

	3.3.2.1	Maintenance curative.....	84
	3.3.2.2	Maintenance préventive.....	91
3.3.3		Conception.....	93
	3.3.3.1	Conception préliminaire.....	97
	3.3.3.2	Analyse sommaire de rentabilité.....	99
	3.3.3.3	Conception détaillée.....	102
	3.3.3.4	Séquences de contrôle.....	104
3.4		Synthèse des défis identifiés et des bonnes pratiques à adopter.....	105

CHAPITRE 4 PERFORMANCE ACTUELLE D'ATC OPÉRÉS DANS DES BÂTIMENTS INSTITUTIONNELS.....109

4.1		Description du site étudié.....	110
4.2		Méthode d'analyse de données d'opération et d'évaluation de la performance.....	111
	4.2.1	Étape 1 : Identifier, nettoyer et prétraiter les données d'opération.....	112
		4.2.1.1 Données manquantes.....	115
		4.2.1.2 Données non disponibles.....	117
	4.2.2	Étape 2 : Établir le mode de contrôle et l'utilisation des ATC.....	117
	4.2.3	Étape 3 : Quantifier la performance énergétique des ATC.....	119
		4.2.3.1 Mesures de débit volumique.....	120
		4.2.3.2 Puissance et énergie thermique fournies.....	122
		4.2.3.3 Puissance appelée et énergie électrique consommée.....	123
		4.2.3.4 Pertes thermiques.....	124
		4.2.3.5 Calibration par bilan d'énergie.....	127
		4.2.3.6 Rendement énergétique.....	129
	4.2.4	Étape 4 : Établir un scénario de substitution.....	129
		4.2.4.1 Puissance appelée et consommation d'électricité du bâtiment.....	130
		4.2.4.2 Consommation de combustible.....	131
		4.2.4.3 Consommation totale d'énergie.....	132
		4.2.4.4 Coûts énergétiques.....	133
		4.2.4.5 Émissions de GES.....	134
4.3		Résultats et analyses de la performance des ATC du site #10.....	134
	4.3.1	Données disponibles, manquantes et aberrantes.....	134
	4.3.2	Mode de contrôle et utilisation des ATC.....	136
	4.3.3	Performance énergétique des ATC.....	146
		4.3.3.1 Débits volumiques d'eau mesurés.....	146
		4.3.3.2 Puissance et énergie thermique fournies.....	148
		4.3.3.3 Puissance appelée et énergie électrique consommée.....	151
		4.3.3.4 Pertes thermiques.....	152
		4.3.3.5 Bilans d'énergie.....	156
		4.3.3.6 Rendement énergétique.....	158
		4.3.3.7 Analyse de la performance énergétique et pistes d'amélioration.....	158
	4.3.4	Scénario de substitution.....	161
		4.3.4.1 Puissance appelée du bâtiment.....	161

4.3.4.2	Consommation d'électricité, de combustible et totale d'énergie.....	162
4.3.4.3	Coûts énergétiques.....	163
4.3.4.4	Émissions de GES.....	164
4.3.4.5	Analyse des résultats du scénario de substitution et discussion.....	165
4.4	Performance actuelle d'autres ATC et synthèse.....	169
CHAPITRE 5 SOLUTIONS POUR AMÉLIORER LES PRATIQUES ET LA PERFORMANCE.....173		
5.1	Méthode d'établissement d'une relation pour estimer la puissance thermique maximale qu'un ATC peut fournir.....	174
5.1.1	Étape 1 : Identifier les données à utiliser.....	174
5.1.2	Étape 2 : Analyser les données et établir des régressions.....	176
5.1.3	Étape 3 : Comparer la relation établie avec les données d'autres sites... ..	176
5.2	Résultats et analyses.....	178
5.3	Synthèse.....	189
CONCLUSION.....191		
RECOMMANDATIONS.....193		
ANNEXE I	FEUILLET D'INFORMATION 1.....	195
ANNEXE II	FEUILLET D'INFORMATION 2.....	197
ANNEXE III	QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE 1.....	199
ANNEXE IV	QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE 2.....	203
ANNEXE V	FICHE SYNTHÈSE : TÂCHES DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE.....	211
ANNEXE VI	SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX DÉFIS À RELEVER.....	215
ANNEXE VII	CALCULS D'INCERTITUDES.....	219
ANNEXE VIII	COEFFICIENT DE DÉPERDITIONS THERMIQUES EFFECTIF.....	227
ANNEXE IX	SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE, CONSTATS ET ACTIONS RECOMMANDÉES.....	231
ANNEXE X	GABARIT DE BILAN D'ÉNERGIE DE L'ATC HYDRONIQUE.....	237
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....241		

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Principales méthodes de gestion de la demande d'électricité.....14
Tableau 1.2	Principales spécifications techniques de l'ATC hydronique Adapté de Steffès (s.d.d, pp. 21-22).....23
Tableau 3.1	Défis potentiels de mise en œuvre et barrières tirés de la revue de la littérature .....60
Tableau 3.2	Thématiques à aborder durant les entretiens .....62
Tableau 3.3	Caractéristiques des participants ayant une expérience personnelle liée à l'opération d'ATC hydroniques Adapté de D'Avignon (2022, p. 30) .....73
Tableau 3.4	Informations sur les remplacements curatifs et préventifs des composants de l'ATC hydronique tirées des entretiens Adapté de D'Avignon (2022, p. 35) .....83
Tableau 3.5	Compilation des remplacements de moteurs de ventilateurs et d'éléments chauffants .....84
Tableau 3.6	Caractéristiques des participants ayant une expérience personnelle de conception incluant l'installation d'ATC hydroniques Adapté de D'Avignon (2022, p. 41) .....94
Tableau 3.7	Bonnes pratiques à adopter .....107
Tableau 4.1	Identification des données d'opération disponibles .....113
Tableau 4.2	Étendues attendues des données .....115
Tableau 4.3	Instrumentation utilisée pour les mesures de débit volumique d'eau .....121
Tableau 4.4	Bilans d'énergie de l'ATC pour les trois états considérés et incertitudes .....128
Tableau 4.5	Coûts unitaires des sources d'énergie .....133
Tableau 4.6	Facteur d'intensité des émissions de GES par source d'énergie Adapté de Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2020)...134
Tableau 4.7	Nombre de valeurs aberrantes et manquantes de la période d'analyse....136

Tableau 4.8	Principaux canaux de configuration CLoc des ATC du site #10.....	137
Tableau 4.9	Débits d'eau moyens des ATC du site #10 (lorsque <i>AutDéch</i> = 1)	147
Tableau 4.10	Puissances thermiques maximales et moyennes fournies par les ATC ...	148
Tableau 4.11	Énergie thermique fournie par les ATC durant la période d'hiver	150
Tableau 4.12	Durée moyenne de décharge et température finale des briques des ATC	151
Tableau 4.13	Énergie électrique consommée par les ATC durant la période d'hiver ...	152
Tableau 4.14	Coefficients de déperditions thermiques effectifs calculés.....	154
Tableau 4.15	Pertes thermiques des ATC durant la période d'hiver	155
Tableau 4.16	Bilan d'énergie saisonnier des ATC pour la période d'hiver	157
Tableau 4.17	Rendements énergétiques saisonniers des ATC	158
Tableau 4.18	Estimation de l'impact de modifier l'autorisation de charge des ATC sur les pertes thermiques et les rendements énergétiques saisonniers	159
Tableau 4.19	Puissances maximales appelées et facteurs d'utilisation mensuels de chaque scénario	161
Tableau 4.20	Consommations d'électricité, de gaz naturel et totale de chaque scénario	163
Tableau 4.21	Coûts d'électricité, de gaz naturel et totaux de chaque scénario	164
Tableau 4.22	Émissions de GES de chaque scénario	164
Tableau 4.23	Indicateurs de performance des ATC selon le scénario de substitution retenu Adapté de D'Avignon (2022, p. 52, 63-64).....	169
Tableau 5.1	Nombre de points conservés par plage de température moyenne des briques	178
Tableau 5.2	Coefficients de la régression entre la différence maximale de température de l'eau et la température moyenne des briques	184

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Stratégies typiques d’opération d’un système de stockage thermique Reproduite et adaptée d’Arteconi, Hewitt, & Polonara (2012, p. 378), avec autorisation	15
Figure 1.2	Accumulateur thermique électrique centralisé hydronique (ThermElect) a) Adaptée de Steffes (2022); b) Reproduite et adaptée de Steffes (s.d.c, p. 5), avec autorisation	18
Figure 1.3	Éléments chauffants et isolant diélectrique en céramique a) Adaptée de Desbiens & Groupe Master (2016); b) Tirée de Steffes (2016, p. 3); c) Tirée de Steffes (s.d.c, p. 14)	26
Figure 1.4	Remplacement attendu d’éléments chauffants par cycle de 10 ans Reproduite et adaptée de Steffes Corporation (s.d.b, p. 2), avec autorisation.....	26
Figure 1.5	Courbe de vitesse de rotation (<i>Speed</i>) d’un moteur PSC dont la tension d’alimentation (V_M) est modulée par un TRIAC Tirée de Cattermole & Davis (1975, p. 787) Copyright ©, IEEE.....	28
Figure 1.6	Courbes de décharge disponibles des deux modèles d’ATC hydroniques indiquant la puissance thermique fournie (kW) en fonction du temps (h) Tirée de Steffes Corporation (s.d.c, p. 1).....	29
Figure 1.7	Températures mesurées par les sondes de l’ATC et canaux associés.....	32
Figure 1.8	Distances à respecter en amont et en aval de l’écoulement pour le positionnement des sondes de débitmètre à ultrasons à temps de transit ..	40
Figure 3.1	Méthode d’analyse de données qualitatives avec la spirale de Creswell Reproduite et adaptée de Creswell (2007, p. 151), avec autorisation.....	68
Figure 4.1	Configuration du réseau de chauffage hydronique du site #10.....	110
Figure 4.2	Position des sondes de température du réseau de chauffage du site #10.	114
Figure 4.3	Position des sondes des débitmètres sur le réseau hydronique du site #10	121
Figure 4.4	Schéma du réseau de chauffage du site #10 selon un scénario biénergie	130
Figure 4.5	Contrôle de la charge des ATC du site #10	138

Figure 4.6	Consigne de température des briques des ATC du site #10 en fonction de la température extérieure actuelle	139
Figure 4.7	Périodes de charge de l'ATC1 entre le 18 et le 20 janvier 2021	140
Figure 4.8	Contrôle de la décharge de l'ATC hydronique	141
Figure 4.9	Modulation de la vitesse commandée au moteur du ventilateur de l'ATC1 en fonction de RLoc114	141
Figure 4.10	Périodes de décharge de l'ATC1 entre le 18 et le 20 janvier 2021.....	142
Figure 4.11	Températures des trois noyaux de briques, autorisations de charge et de décharge de l'ATC1 entre le 17 et le 25 janvier 2021	143
Figure 4.12	Profil de puissance appelée du bâtiment et gestion de la demande liée au chauffage par la décharge des ATC et l'écrêtage avec du combustible.....	145
Figure 4.13	Débits d'eau mesurés et autorisations de décharge des ATC	146
Figure 4.14	Distribution de la vitesse commandée au moteur du ventilateur	149
Figure 4.15	Distribution de la température moyenne des briques.....	149
Figure 4.16	Évolution de la température moyenne des briques pendant une période d'attente et régression linéaire.....	153
Figure 4.17	Distribution du coefficient de déperditions thermiques effectif.....	154
Figure 4.18	Distribution du bilan d'énergie des ATC en décharge avant et après calibration	157
Figure 4.19	Profil de puissance appelée du bâtiment avec et sans ATC.....	162
Figure 5.1	Puissance thermique fournie en fonction de la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$).....	180
Figure 5.2	Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur en fonction de la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$).....	180
Figure 5.3	Impact de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur sur $\Delta T_{eau,max}$ a) Températures d'entrée disponibles; b) Valeurs moyennes de $\Delta T_{eau,max}$	182

Figure 5.4	Régression entre la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur et la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$).....	184
Figure 5.5	Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur d'un ATC avec un débit d'eau de 0,44 L/s (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$).....	185
Figure 5.6	Puissance thermique maximale fournie par un ATC avec un débit d'eau de 0,44 L/s (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$).....	186
Figure 5.7	Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur pour des débits d'eau comparables à ceux des ATC du site #10 (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)	187
Figure 5.8	Indice d'uniformité de température des noyaux de briques des ATC des sites #5, #10 et #11	188

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Abréviations :

approx.	approximatif
c.-à-d.	c'est-à-dire
ch.	chaque; chacun
Cons.	consigne
Déc.	décembre
Diff.	différence
Dim.	dimanche
élec.	électrique; électricité
équiv.	équivalent
Ex. État	exemplarité de l'État
Fév.	février
G. pte.	gestion de pointe
ID	identifiant
Inst.	instantané
int. conf.	intervalle de confiance
Janv.	janvier
Jeu.	jeudi
jrs.	jours
Lun.	lundi
Mar.	mardi
max.	maximal; maximum

XXII

Mer.	mercredi
Mes.	mesure; mesuré
min.	minimal; minimum
moy.	moyen
Nb	nombre
nd	non disponible
p.	page
p. ex.	par exemple
Rég.	régression
Rempl.	remplacement
Sam.	samedi
Subst.	substitution
s.d.	sans date
s. o.	sans objet
S. princ.	source principale
un.	unité
Utilis.	utilisation
Ven.	vendredi

Sigles :

AHRI	Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute
ATC	Accumulateur thermique électrique centralisé
BEFI	Average Dynamic Building Energy Flexibility Index
BMS	Building Management System

CLoc	Configuration Location
CSS	Centre de services scolaire
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error
CTA	Consommation totale annuelle
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air
C&I	Commercial et institutionnel
DJ _{c18}	Degrés-jours de chauffage à une température d'équilibre de 18°C
ECD	Eau chaude domestique
EEG	Économies d'énergie garanties
ESE	Entreprise de services écoénergétiques
ÉTS	École de technologie supérieure
FU	Facteur d'utilisation
GES	Gaz à effet de serre
HQ	Hydro-Québec
IPMVP	International Performance Measurement and Verification Protocol
JCGM/WG 1	Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology
MEES	Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur
NMBE	Normalized Mean Biased Error
OA	Air extérieur
PSC	Permanent-Split Capacitor
RAD	Radiateurs à eau chaude
RLoc	Read Only Location
R ²	Coefficient de détermination

$R^2_{\text{ajusté}}$	Coefficient de détermination ajusté
SEAO	Système électronique d'appel d'offres du Gouvernement du Québec
SQI	Société québécoise des infrastructures
SSR	Solid-State Relay

Acronymes :

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BACnet™	Building Automation and Control Networks
IRENA	International Renewable Energy Agency
SPEDE	Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission
TEQ	Transition énergétique Québec
TRIAC	Triode for Alternating Current

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Symboles :

<i>A</i>	Surface (m ²)
<i>Année</i>	Année (adimensionnel)
<i>AutCh</i>	Autorisation de charge (adimensionnel)
<i>AutDéch</i>	Autorisation de décharge (adimensionnel)
<i>Bi</i>	Nombre de Biot (adimensionnel)
<i>Bilan</i>	Bilan d'énergie (kW, kWh)
<i>CLoc</i>	Configuration Location (adimensionnel)
<i>Coûts</i>	Coûts d'énergie et de puissance (\$)
<i>C_p</i>	Capacité thermique massique à pression constante (kJ/kg·K)
<i>CV(RMSE)</i>	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (%)
<i>E</i>	Énergie électrique (kWh)
<i>E_{GES}</i>	Émissions de gaz à effet de serre (kgCO ₂ éq)
<i>FC</i>	Facteur de conversion (L/Gal _{us})
<i>FE</i>	Facteur d'intensité des émissions de GES (kgCO ₂ éq/kWh)
<i>FU</i>	Facteur d'utilisation (%)
<i>h</i>	Coefficient de convection (W/m ² ·K)
<i>H</i>	Nombre d'heures (h)
<i>k</i>	Conductivité thermique (W/m·K)
<i>L_c</i>	Longueur caractéristique (m)
<i>M</i>	Masse (kg)
<i>MOD</i>	Modulation de la puissance électrique (%)

XXVI

N	Nombre total (unités selon le cas)
$Nb \text{ Noyaux } Ch$	Nombre de noyaux en charge (adimensionnel)
$Nb \text{ saisons}$	Nombre total de saisons de chauffage complétées (adimensionnel)
$NMBE$	Normalized Mean Biased Error (%)
P	Puissance électrique (kW)
P_{cal}	Pouvoir calorifique (GJ/L, GJ/m ³)
Q	Énergie thermique (kJ, kWh)
\dot{Q}	Puissance thermique (W, kW)
$RLoc$	Read Only Location (adimensionnel)
t	Temps (s, h)
T	Température (°C)
TUI	Temperature Uniformity Index (%)
u	Incertitude (unités selon le cas)
u_c	Incertitude combinée (unités selon le cas)
U	Coefficient d'échange global (W/m ² ·K, kW/m ² ·K)
UA	Coefficient de déperditions thermiques (W/K, kW/K)
v_{vent}	Vitesse commandée au moteur du ventilateur (%)
\dot{V}	Débit volumique (L/s)
x	Paramètre indépendant d'une équation donnée (unités selon le cas)
y	Paramètre dépendant d'une équation donnée (unités selon le cas)
ρ	Densité (kg/m ³ , kg/L)
η	Rendement énergétique (%)
τ	Constante de temps (s ⁻¹)

Δ Variation (unités selon le cas)

Indices :

air Air

amb Ambiant

ATC Accumulateur thermique électrique centralisé

Att Attente

bât Bâtiment

briques Briques

Ch Charge

comb Combustible

cons Consigne

d Début

Déch Décharge

délestage Délestage

Dém Démantèlement

eau Eau

éch Échangeur de chaleur

effectif Effectif

élec Électrique

ext Extérieur

f Fin

GNat Gaz naturel

hiver Période d'hiver (c.-à-d. entre le 1^{er} décembre et le 31 mars)

XXVIII

<i>i</i>	Estampille temporelle
<i>in</i>	Input
<i>Inst</i>	Installation
<i>int</i>	Interne
<i>j</i>	Estampille temporelle
<i>max</i>	Maximal; Maximum
<i>maz</i>	Mazout
<i>mois</i>	Mois de l'année; Mensuel
<i>n</i>	Incrément numérique
<i>Noyau</i>	Noyau de briques
<i>pertes</i>	Pertes thermiques
<i>out</i>	Output
<i>saison</i>	Saison; Saisonnier
<i>stock</i>	Stocké
<i>subst</i>	Substitution
<i>Total</i>	Total
<i>t=0</i>	À l'estampille temporelle initiale

Unités de mesure :

UNITÉS DE BASE		UNITÉS MÉCANIQUES (suite)	
m	mètre (unité de longueur)	Densité d'énergie	
kg	kilogramme (unité de masse)	kWh/m ³	kilowatt-heure par mètre cube
s	seconde (unité de temps)	Puissance	
A	ampère (unité d'intensité de courant électrique)	MW	mégawatt
K	kelvin (unité de température)	kW	kilowatt
UNITÉS GÉOMÉTRIQUES		W	watt
Longueur		HP	<i>horsepower</i> ($\approx 745,7$ W)
m	mètre	UNITÉS ÉLECTRIQUES	
Aire		Intensité de courant électrique	
m ²	mètre carré	A	ampère
Volume		Différence de potentiel (Tension)	
m ³	mètre cube	V	volt
L	litre (= 0,001 m ³)	Résistance et conductance électriques	
UNITÉS DE TEMPS		Ω	ohm
h	heure (= 3 600 s)	Capacité électrique	
min	minute (= 60 s)	μ F	microfarad
s	seconde	UNITÉS CALORIFIQUES	
UNITÉS DE MASSE		Température	
Masse		K	kelvin
t	tonne (= 1 000 kg)	°C	degré Celsius
kg	kilogramme	Conductivité thermique	
Masse volumique (Densité)		W/m·K	watt par mètre par kelvin
kg/m ³	kilogramme par mètre cube	Convection	
kg/L	kilogramme par litre	W/m ² ·K	watt par mètre carré par kelvin
Débit massique		Capacité thermique massique	
kg/s	kilogramme par seconde	kJ/kg·K	kilojoule par kilogramme par kelvin
Débit volumique		Capacité thermique volumique	
m ³ /s	mètre cube par seconde	kJ/m ³ ·K	kilojoule par mètre cube par kelvin
L/s	litre par seconde	Pouvoir calorifique	
UNITÉS MÉCANIQUES		kJ/L	kilojoule par litre
Vitesse angulaire		UNITÉS D'ÉMISSIONS DE GES (CO₂éq)	
r/min	tour par minute	Masse de CO₂éq	
Énergie, travail, quantité de chaleur		tCO ₂ éq	tonne de CO ₂ équivalent
GJ	gigajoule	kgCO ₂ éq	kilogramme de CO ₂ équivalent
MJ	mégajoule	Intensité de CO₂éq	
kJ	kilojoule	kgCO ₂ éq/kWh	kilogramme de CO ₂ équivalent par kilowatt-heure
J	joule		
kWh	kilowatt-heure (= 3 600 kJ)		

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de transition énergétique, des engagements, tels que celui de l'exemplarité de l'État du gouvernement du Québec, sont pris afin de décarboner les sources de chauffage des bâtiments institutionnels existants (Gouvernement du Québec, 2020). À cet effet, l'objectif fixé à l'horizon 2030 est de réduire de 60% les émissions de gaz à effet de serre (GES) de ce secteur par rapport au niveau de 1990. L'intensité des émissions de GES liées à la consommation d'électricité au Québec est parmi les plus faibles au Canada, puisqu'étant essentiellement produite à partir de ressources renouvelables (Environnement et changement climatique Canada, 2022). L'électricité peut donc contribuer à la décarbonation des sources de chauffage, d'autant plus qu'elle a longtemps été abondante et à faible coût au Québec. Cette situation est toutefois en train de changer, puisque les « surplus » annuels d'énergie électrique diminuent et la gestion de la demande en puissance électrique devient un enjeu de plus en plus important en hiver (Whitmore & Pineau, 2022).

Cet enjeu de gestion de la demande d'électricité est déjà présent en hiver au Québec, puisqu'environ 15% de la consommation totale annuelle d'énergie des bâtiments commerciaux et institutionnels (C&I) est l'électricité qui sert au chauffage (Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada, 2019). Cela engendre une forte demande durant les périodes froides, ce qui est un enjeu tant pour les services publics qui fournissent l'électricité, principalement Hydro-Québec, que pour les consommateurs. La décarbonation des sources de chauffage accentue cet enjeu. En effet, les services publics doivent adapter leurs infrastructures de production, de transport et de distribution pour répondre à l'augmentation de la demande d'électricité, particulièrement en période hivernale (Hydro-Québec Distribution, 2019). Pour pallier une augmentation soudaine de la demande, ils achètent de l'électricité à d'autres producteurs ou recourent à des infrastructures auxiliaires de production. Cette gestion de la demande impacte les coûts d'exploitation pour les services publics et se répercute sur les coûts facturés aux consommateurs. C'est pourquoi les bâtiments C&I abonnés à certains tarifs, notamment les tarifs M et G9 d'Hydro-Québec, sont facturés non seulement en fonction de leur consommation d'énergie électrique, en kWh, mais aussi en fonction de leur appel maximal

mensuel de puissance, en kW. Le coût de l'appel maximal de puissance est élevé, en considérant qu'il peut être de très courte durée. De plus, durant les mois d'hiver, cet appel maximal impacte la puissance minimale facturée pendant les 12 mois suivants (Hydro-Québec, 2021). Les consommateurs ont donc intérêt à limiter l'augmentation de l'appel maximal de puissance à la suite d'une décarbonation du chauffage comportant une conversion à l'électricité. Pour ce faire, des mesures de gestion de la demande doivent être mises en place.

L'installation d'équipements de stockage est une mesure de gestion de la demande d'électricité d'un bâtiment. En stockage thermique, l'énergie est stockée sous forme de chaleur, pour desservir des applications de chauffage de l'air ou de l'eau dans un bâtiment. L'accumulateur thermique électrique centralisé (ATC) est un équipement de stockage thermique sensible dans lequel des éléments chauffants réchauffent des briques lorsque la demande d'électricité du bâtiment le permet. Cette chaleur est extraite des briques pour alimenter le réseau de chauffage centralisé du bâtiment lorsqu'il y a un besoin thermique à combler, sans impacter significativement la demande d'électricité liée au chauffage. L'ATC est donc une technologie dont les consommateurs et les services publics peuvent bénéficier et qui peut contribuer à la transition énergétique du chauffage des bâtiments, tout en maintenant les conditions de confort dans ceux-ci. Un ATC hydronique, dénommé ThermElect, a été développé par le Laboratoire des technologies de l'énergie d'Hydro-Québec, fabriqué par le manufacturier Steffes et commercialisé à partir de 2006 (Hydro-Québec, 2010). Ce projet de recherche se concentre sur cet ATC hydronique qui est adapté aux besoins thermiques de bâtiments C&I et qui a été installé au sein du parc immobilier scolaire québécois.

La littérature comporte plusieurs études de cas qui ont été réalisées pour évaluer l'impact d'installer des accumulateurs thermiques électriques sur la demande d'électricité d'un bâtiment donné et sur le réseau de distribution électrique. Ces études portent pour la plupart sur des accumulateurs décentralisés et centralisés à air forcé destinés au secteur résidentiel, ce qui n'est pas l'équipement ni le secteur visés par ce projet de recherche. Quelques-unes portent sur les ATC hydroniques destinés au secteur institutionnel, dont celle de Belzile, Kajl, Rousse, & Dutil (2012), mais elles ne visent pas à quantifier ni à améliorer la performance in situ de cet

équipement, ce qui permettrait pourtant d'accélérer la décarbonation des sources de chauffage et la gestion efficace de la demande d'électricité. Le retour d'expérience vécue par les concepteurs d'installations d'ATC hydroniques et par le personnel d'opération et de maintenance de bâtiments institutionnels qui en comportent n'est pas non plus documenté, ce qui permettrait pourtant d'améliorer les pratiques de mise en œuvre de cet équipement. Plus précisément, les aspects suivants sur les ATC hydroniques apparaissent sous-documentés dans la littérature :

- les éléments requis pour améliorer la conception;
- les éléments clés de la mise en service et de la stratégie de contrôle à mettre en place;
- les enjeux d'opération vécus et comment ils ont été surmontés;
- la maintenance requise et les coûts associés;
- une méthode pour quantifier la performance in situ à partir de données d'opération;
- l'impact énergétique, économique et environnemental in situ de l'ATC.

Ce manque d'information, principalement sur les conditions à mettre en place pour assurer la performance de l'ATC hydronique et sur l'expérience vécue par les intervenants sur le terrain, peut entretenir certaines barrières vis-à-vis de l'adoption de la technologie.

Face à ces barrières, l'objectif principal de recherche est de **faciliter la mise en œuvre des accumulateurs thermiques électriques centralisés hydroniques dans les bâtiments institutionnels**, plus spécifiquement dans les Centres de services scolaires (CSS) au Québec. Par « faciliter », il est question d'identifier des barrières à la mise en œuvre de l'ATC hydronique et de proposer des moyens concrets de les surmonter. « La mise en œuvre », dans ce mémoire, englobe les phases de conception, de mise en service, d'opération et de maintenance. Dans cette optique, trois objectifs spécifiques sont formulés ci-dessous et des sous-questions de recherche sont énoncées pour chacun d'eux.

1. Identifier les défis à relever et les leçons apprises en lien avec les pratiques actuelles de mise en œuvre d'ATC.

1.1. Quels sont les défis de mise en œuvre auxquels les divers intervenants sont susceptibles d'être confrontés?

1.2. Comment les transitions entre les phases de la mise en œuvre d'un ATC pourraient-elles être améliorées?

1.3. Quels sont les bénéfices et les risques associés à l'installation d'un ATC dans un bâtiment institutionnel?

2. Quantifier la performance actuelle d'ATC opérés dans des bâtiments institutionnels.

2.1. Comment peut-on mesurer la performance in situ d'un ATC?

2.2. Quel est l'impact actuel des ATC sur l'appel de puissance électrique, sur les émissions de GES et sur les coûts énergétiques?

2.3. Dans quelles conditions sont actuellement opérés les ATC et quels en sont les impacts sur la performance?

3. Proposer des solutions pour améliorer les pratiques de mise en œuvre et la performance des futures installations d'ATC.

3.1. Qu'est-ce qui pourrait améliorer la performance in situ d'ATC?

3.2. Comment peut-on améliorer les pratiques actuelles de mise en œuvre dans l'optique d'améliorer la performance des ATC?

3.3. Comment peut-on effectuer le suivi de performance de l'ATC à partir de données d'opération?

Pour atteindre ces objectifs spécifiques, la méthodologie globale de recherche qui est employée est mixte, c'est-à-dire qu'elle comporte une partie qualitative et une partie quantitative (Leedy, Ormrod, & Johnson, 2019). Le premier objectif spécifique est abordé par une méthode essentiellement qualitative à partir d'entrevues semi-dirigées avec des personnes ayant de l'expérience de mise en œuvre d'ATC hydroniques. Le second objectif spécifique est quant à lui abordé avec une méthode quantitative exploitant des données d'opération pour quantifier la performance in situ d'ATC hydroniques. Le troisième objectif spécifique vise à proposer des solutions concrètes à adopter et combine à la fois un aspect qualitatif et quantitatif.

Ce mémoire débute par une revue critique de la littérature (Chapitre 1). Le chapitre suivant détaille la méthodologie globale de recherche (Chapitre 2). Le mémoire est ensuite divisé en

trois chapitres qui adressent plus particulièrement les objectifs spécifiques suivants : cerner les défis à relever lors de la mise en œuvre d'ATC hydroniques et les leçons apprises (Chapitre 3), évaluer la performance in situ d'ATC (Chapitre 4) et proposer des solutions pour améliorer les pratiques actuelles de mise en œuvre et la performance in situ (Chapitre 5). Chacun de ces trois chapitres comprend sa propre mise en contexte, méthodologie, résultats, analyses et discussions. Le mémoire conclut par des pistes de réponses aux sous-questions de recherche énoncées précédemment et des recommandations pour les travaux futurs.

La contribution principale de ce projet de recherche est d'outiller les professionnels et les techniciens de l'industrie vers une meilleure maîtrise de la mise en œuvre de l'ATC hydronique. En ciblant les défis et les pratiques actuelles de mise en œuvre, ainsi qu'en quantifiant la performance in situ, ce mémoire propose des solutions qui sont adaptées au contexte de mise en œuvre dans un bâtiment d'un CSS. Les gestionnaires de bâtiments institutionnels dont les CSS, le personnel d'opération et de maintenance, les concepteurs et toute organisation concernée par la gestion de la demande d'électricité pour le chauffage pourront être intéressés par les conclusions de cette recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre présente la revue de la littérature et est divisé en quatre sections. La première section présente différents types de systèmes de stockage thermique, les bénéfices anticipés et les éléments critiques de leur mise en œuvre tels que documentés dans la littérature. Ces éléments critiques permettront de cibler des défis potentiels à relever lors de la mise en œuvre de l'ATC pour le chauffage d'un bâtiment, ce qui est directement lié à l'objectif spécifique 1. La seconde section présente l'ATC, avec un accent sur la version hydronique, puisque c'est sur celle-ci que porte ce projet de recherche. Les informations disponibles et manquantes dans la littérature sur ses principaux composants sont relevées, afin d'identifier comment les éléments critiques de la mise en œuvre identifiés dans la première section s'appliquent spécifiquement à l'ATC hydronique. D'autre part, cet équipement étant toujours disponible sur le marché, ses composants sont sujets à des changements technologiques. Faire le point sur les caractéristiques de ces composants circonscrit donc l'équipement sur lequel porte ce projet de recherche. Des installations d'ATC documentées dans la littérature sont aussi présentées dans cette seconde section afin de cerner les contextes ayant justifié le recours au stockage thermique, au Québec et ailleurs, ce qui facilitera la mise en œuvre de futures installations, soit l'objectif principal de recherche. La troisième section présente comment la performance in situ d'un ATC peut être quantifiée, à partir de guides, de normes, de projets de recherche et d'articles tirés de la littérature. Cette section permettra de définir les indicateurs à préconiser dans ce mémoire pour quantifier la performance in situ d'ATC hydroniques, ce qui est directement lié à l'objectif spécifique 2. La dernière section résume les constats tirés de la revue de la littérature et leurs liens avec les objectifs de recherche.

1.1 Le stockage thermique

Différents systèmes constituent une forme de stockage thermique. Ils ont en commun la capacité de stocker de l'énergie sous forme de chaleur. La charge et la décharge sont les deux principaux modes d'opération d'un système de stockage, tel que décrit par l'American Society

of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE); la charge correspond à une augmentation de la quantité d'énergie stockée, alors que la décharge correspond à une diminution de celle-ci, puisque le système fournit de l'énergie (ASHRAE, 2020d). Lorsque le système n'est ni en charge ni en décharge, il est en état « d'attente » et maintient une certaine quantité d'énergie stockée, un niveau de charge (*state-of-charge*, en anglais). Cette énergie stockée permet au système de stockage thermique de découpler temporellement le besoin thermique comblé par la décharge et le stockage d'énergie effectué lors de la charge. L'attrait de ce découplage est de stocker de l'énergie lorsqu'elle est disponible afin de limiter la consommation d'énergie durant des moments ciblés, soit parce qu'elle n'est disponible qu'à certains moments, comme l'énergie provenant de sources intermittentes (p. ex. solaire, éolien), ou parce que son prix varie selon le moment de la journée, comme l'énergie électrique vendue par certains services publics. Durant l'attente, le système libère toutefois de son énergie stockée par transfert thermique avec l'environnement extérieur : il s'autodécharge (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Tout système peut donc maintenir l'énergie stockée pendant une durée limitée.

Outre ces points communs, les systèmes de stockage thermique se distinguent par les caractéristiques suivantes, tel que décrit par Kalaiselvam et Parameshwaran (2014) :

- le procédé physico-chimique permettant d'emmagasiner et de restituer la chaleur : thermique sensible, thermique latent, thermo-chimique;
- la durée entre les cycles de charge et de décharge : stockage à long terme (saisonnier), stockage à court terme (journalier, horaire);
- le ou les états du matériau de stockage : liquide, solide, gazeux;
- l'application visée lors de la décharge : chauffage, climatisation¹ ou les deux;
- la plage de température du matériau de stockage;
- le recours à au moins un composant qui consomme de l'énergie pour charger ou décharger le système : système actif, par opposition à un système passif.

¹ Au sens strict, la charge d'un système dédié à la climatisation diminue la quantité d'énergie thermique stockée dans le matériau par rapport à l'environnement extérieur. À l'inverse, la décharge l'augmente.

Ce projet de recherche porte sur l'ATC hydronique, un système actif, destiné à des applications de chauffage, qui permet de stocker à court terme de l'énergie thermique sensible. La chaleur stockée dans le matériau, des briques, est fournie par des éléments chauffants électriques. C'est donc un système de stockage thermique électrique. La section 1.2 le présentera plus en détail. Pour identifier des défis potentiels de mise en œuvre dans la littérature, d'autres systèmes de stockage thermique que l'ATC hydronique, tant sensibles que latents, seront abordés puisqu'ils présentent des similitudes avec les défis qui seront exposés dans le Chapitre 3.

Le stockage thermique sensible consiste à élever la température du matériau de stockage et à exploiter sa capacité thermique massique élevée. Comme l'indique l'équation (1.1), l'énergie stockée (Q_{stock}) est définie par le produit de la masse du matériau (M), sa capacité thermique massique (C_p) ainsi que l'écart entre la température du matériau et la température minimale à laquelle il peut être refroidi (ΔT), pouvant être définie soit par la température ambiante ou par la température requise pour l'application visée. Pour une quantité d'un matériau et une température minimale données, la capacité maximale de stockage dépend donc de la température jusqu'à laquelle on peut le chauffer.

$$Q_{stock} = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Les réservoirs d'eau chaude, d'eau glacée, les accumulateurs thermiques électriques décentralisés et centralisés sont des exemples de systèmes de stockage thermique sensible. Ils sont utilisés pour du stockage à court terme, sur une base journalière par exemple, considérant leur autodécharge. Un système géothermique est aussi du stockage thermique sensible, mais qui peut être utilisé pour du stockage intersaisonnier, donc à plus long terme. Ces exemples de systèmes sont tous dits « actifs » puisque des composants consommant de l'énergie, par exemple une pompe ou un ventilateur, sont requis pour les charger et les décharger. Ces composants permettent de contrôler la quantité d'énergie stockée et les moments auxquels l'énergie est stockée et déstockée. Pour s'assurer qu'ils fonctionnent adéquatement, il faut évidemment s'assurer du bon état de ces composants et effectuer la maintenance requise. A contrario, un thermosiphon constitué de collecteurs solaires thermiques et d'un réservoir d'eau

chaude ou une dalle de béton chauffée par le rayonnement solaire entrant par la fenestration d'un bâtiment sont des exemples de systèmes passifs. Ces systèmes comportent moins de composants exigeant une maintenance que les systèmes actifs. Il n'est toutefois pas possible de contrôler la quantité d'énergie stockée avec ce type de système, ni de présumer qu'il pourra combler ultérieurement un besoin thermique. Ce second exemple de système passif requiert le plus souvent d'être intégré à même le bâtiment dès sa construction, puisque c'est plus difficile techniquement et coûteux de le faire par la suite, ce qui restreint son application dans les bâtiments existants. Les systèmes actifs sont ainsi mieux adaptés à une intégration dans les bâtiments existants visant à décarboner leurs sources de chauffage et à gérer leur demande d'électricité. C'est donc sur ces systèmes que portent les trois sous-sections suivantes qui abordent les défis potentiels à relever lors des phases de la mise en œuvre, soit dans l'ordre de présentation, la maintenance, la mise en service et l'opération et finalement, la conception.

1.1.1 Maintenance

En combinant plusieurs composants, la complexité globale d'un système actif augmente, tout comme la possibilité de défaillance et de sous-performance. Weishaupt et Müller (2021) ont comparé la fiabilité de différents systèmes de stockage thermique actifs sur la base du taux de défaillance de composants individuels menant à un dysfonctionnement partiel ou généralisé des systèmes. Pour le chauffage de bâtiments multirésidentiels avec des réservoirs d'eau chaude, les pompes sont les composants les plus sujets à défaillir. Une telle défaillance empêche de stocker et de déstocker l'énergie dans le système, ce qui impacte sa performance et mène à un dysfonctionnement généralisé. Comme le chauffage d'un bâtiment multirésidentiel et institutionnel présentent des similarités et que l'ATC hydronique comporte aussi une pompe pour déstocker l'énergie, ce constat est important à retenir pour établir les interventions prioritaires de maintenance à effectuer. D'autre part, les auteurs de cette étude concluent que la complexité et la tendance à défaillir des systèmes dédiés au secteur multirésidentiel s'accroissent entre les systèmes de stockage thermique sensible, latent et thermochimique. Pour le secteur industriel, cette conclusion est inversée, c'est-à-dire que les systèmes de stockage thermique sensible dédiés à ce secteur sont plus sujets à défaillir que les

latents et thermochimiques. **Il est donc particulièrement important de circonscrire l'utilisation visée d'un système, puisqu'il peut convenir à une application et ne pas être adapté à une autre.** De plus, ces conclusions dépendent largement des systèmes considérés et non uniquement du procédé physico-chimique de stockage. Une connaissance adéquate des caractéristiques du système et de ses composants est donc requise pour en faciliter la mise en œuvre, ce qui fait l'objet de la sous-section 1.2.2 portant spécifiquement sur l'ATC hydronique. Ce qui détermine si l'utilisation visée d'un système concorde avec l'utilisation qui en est réellement faite dépend en grande partie des séquences de contrôle implantées lors de la mise en service, tel qu'expliqué dans la prochaine sous-section.

1.1.2 Mise en service et opération

Les conditions d'opération, plus spécifiquement les séquences de contrôle, sont cruciales pour assurer la performance d'un système de stockage thermique actif. Glazer (2019) souligne que : « plusieurs, sinon la majorité des problèmes rencontrés avec ces systèmes sont liés à des problèmes de contrôle ou de mise en service » [traduction libre] (« *Many if not most problems with storage systems can be traced to incorrect control logic or implementation.* », Glazer, 2019, p. 8). Ce constat, bien que tiré d'un guide outillant la conception avec des systèmes de stockage thermique sensible et latent pour la climatisation, peut s'appliquer à d'autres types de systèmes et d'applications, tels que le chauffage avec des ATC hydroniques.

Ces problèmes de contrôle ou de mise en service peuvent venir du fait que les systèmes de stockage thermique fonctionnent différemment des systèmes de chauffage et de climatisation « conventionnels » (p. ex. chaudière, refroidisseur). En effet, il faut prévoir charger à l'avance le système de stockage en fonction des **besoins anticipés** à combler, alors qu'un système conventionnel est opéré en fonction d'un **besoin instantané** à combler. Les séquences de contrôle doivent être élaborées pour un cycle complet de charge-attente-décharge-attente-charge. Ces séquences et les équipements requis pour leur implantation doivent être robustes, puisqu'un problème empêchant la charge du système va impacter la décharge, et vice-versa, affectant la performance. L'élaboration et l'implantation de ces séquences sont donc

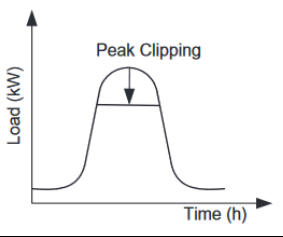
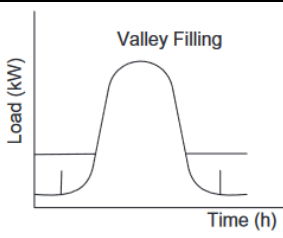
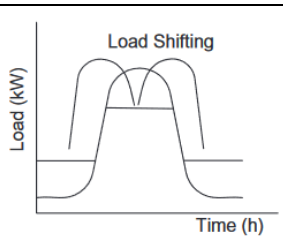
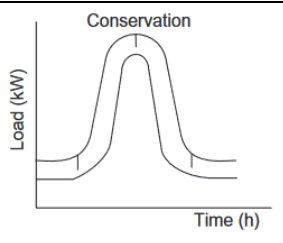
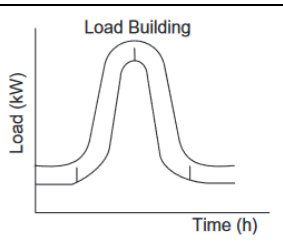
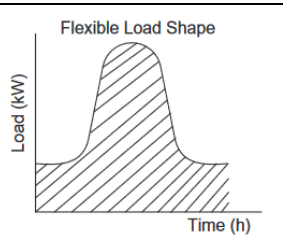
différentes de celles des systèmes conventionnels. Glazer (2019) mentionne qu'elles **requièrent une attention particulière lors de la conception et que des indications claires doivent être fournies aux entrepreneurs en contrôle chargés de la mise en service.** L'élaboration des séquences varie selon les bénéfices recherchés par l'opération du système de stockage. Ces bénéfices dépendent entre autres de la source d'énergie utilisée pour la charge et de la source d'énergie que le système permet de substituer lors de la décharge. Dans la suite de ce mémoire, l'accent est mis sur l'électricité comme source d'énergie de charge et de substitution, caractéristique du stockage thermique électrique. La littérature fait état de ces bénéfices selon deux points de vue différents : celui des services publics qui fournissent l'électricité et celui des consommateurs.

Du point de vue des services publics, le stockage thermique électrique est une façon d'ajuster la demande à la production d'électricité, donc une mesure de gestion de la demande (*demand-side management*, en anglais). Cela permet de fournir de l'électricité à plus de consommateurs, tout en gardant un contrôle de la demande en puissance sur les installations du réseau. Du point de vue du consommateur, c'est une façon de consommer de l'électricité sans payer des tarifs élevés, tout en maintenant les conditions de confort dans le bâtiment. L'élément clé de la gestion de la demande, qui est commun à ces deux points de vue, est de contrôler le moment et le taux (c.-à-d. la puissance) auxquels l'énergie est consommée. C'est une distinction importante par rapport aux mesures d'efficacité énergétique qui visent plutôt à réduire la consommation d'énergie, sans égard au moment et au taux auxquels elle est consommée.

Le Tableau 1.1 décrit six méthodes de gestion de la demande d'électricité fréquemment présentées dans la littérature. Les figures a) à f) de ce tableau présentent différents profils de puissance électrique, *load* (kW), en fonction du temps, *time* (h). Le vocabulaire utilisé dans la littérature pour les définir est souvent adapté au point de vue des services publics. Néanmoins, le principe derrière celles-ci s'applique aussi au point de vue des consommateurs. Le stockage thermique électrique, qui inclut l'ATC hydronique, est particulièrement adapté au nivelage (b) et au déplacement (c). Le nivelage (b) peut résulter de la conversion de systèmes de chauffage non électrique pour du stockage thermique électrique, tout en maintenant la même puissance

maximale durant les périodes de pointe. Cela évite donc aux services publics d'augmenter la capacité de production, de transport et de distribution d'électricité pour répondre à une demande élevée pendant une courte période de l'année. Du point de vue des consommateurs, c'est un moyen d'électrifier des charges (p. ex. le chauffage) sans augmenter l'appel maximal de puissance qui leur est facturé et de consommer de l'électricité à plus faible coût, lorsque les tarifs varient selon le moment de la journée. Quant au déplacement (c), cela correspond à l'usage de charges déjà électrifiées lors de périodes creuses plutôt que lors des périodes de pointes. Un système de chauffage électrique remplacé ou combiné à du stockage thermique électrique permettrait de faire du déplacement. L'écrêtage (a) consiste à réduire la demande maximale, par exemple en utilisant un système de chauffage biénergie alimenté par un combustible (p. ex. fossile, biomasse) durant les périodes de pointe. Les méthodes de décroissance et de croissance stratégiques (d et e) résultent en un impact plus marqué sur la consommation d'énergie électrique, soit l'intégrale de la courbe de puissance en fonction du temps, que sur la puissance maximale. La puissance interruptible (f) a quant à elle un potentiel très élevé de gestion de la demande pour le service public, mais son application est restreinte parce que le consommateur doit interrompre ou réduire temporairement sa consommation d'électricité. En contrepartie, le service public dédommage le client. Cette méthode permet surtout au service public d'agir rapidement face à une augmentation ponctuelle de la demande sur le réseau, par exemple lors des périodes froides durant l'hiver au Québec. Cette méthode a ainsi un impact ponctuel sur la demande, alors que les autres méthodes ont un impact qui perdure et dont les bénéfices rejoignent tant les intérêts des services publics que des consommateurs. Pour les consommateurs, c'est l'élaboration de séquences de contrôle robustes de nivelage (b) et de déplacement (c) qui va leur permettre de pérenniser les bénéfices du stockage thermique électrique sur la demande d'électricité de leurs bâtiments.

Tableau 1.1 Principales méthodes de gestion de la demande d'électricité

Méthode de gestion de la demande d'électricité*	Description
a) Écrêtage (<i>Peak Clipping</i>) 	Réduction de la demande d'électricité durant les périodes de pointe en recourant à d'autres sources d'énergie ou en interrompant des charges électriques non essentielles.
b) Nivelage (<i>Valley Filling</i>) 	Augmentation de la demande d'électricité, et de la consommation d'énergie associée, durant les périodes creuses.
c) Déplacement (<i>Load Shifting</i>) 	Réduction de la demande d'électricité durant les périodes de pointe. Déplacement de cette demande, et de la consommation d'énergie associée, en périodes creuses.
d) Décroissance stratégique (<i>Strategic Conservation</i>) 	Réduction de la demande d'électricité, et de la consommation d'énergie associée, tout en gardant un profil de demande similaire. Correspond à de l'efficacité énergétique.
e) Croissance stratégique (<i>Load Building</i>) 	Augmentation de la demande d'électricité, et de la consommation d'énergie associée, tout en gardant un profil de demande similaire.
f) Puissance interruptible (<i>Flexible Load Shape</i>) 	Interruption temporaire, totale ou partielle, de la demande d'électricité, à la suite d'un accord convenu entre le service public et le consommateur.

*Figures tirées de Sallam & Malik (2011, p. 440)

Outre la gestion de la demande d'électricité, ce qui importe pour le consommateur c'est de maintenir les conditions de confort à l'intérieur du bâtiment. Pour ce faire, les séquences de contrôle doivent prévoir l'intégration du système de stockage thermique électrique avec les autres systèmes de chauffage, de climatisation et équipements afin de contrôler la demande totale d'électricité du bâtiment, tout en comblant les besoins thermiques. Ces séquences sont donc spécifiques à chaque bâtiment, d'où la nécessité d'y accorder une attention particulière. Dans la littérature, le cas typique d'un refroidisseur couplé à un réservoir d'eau glacée est utilisé pour catégoriser les principales stratégies implantées dans les séquences. La Figure 1.1 montre quatre stratégies d'opération d'un tel système, permettant de combler le même profil de besoins thermiques qui est illustré par la courbe bleue.

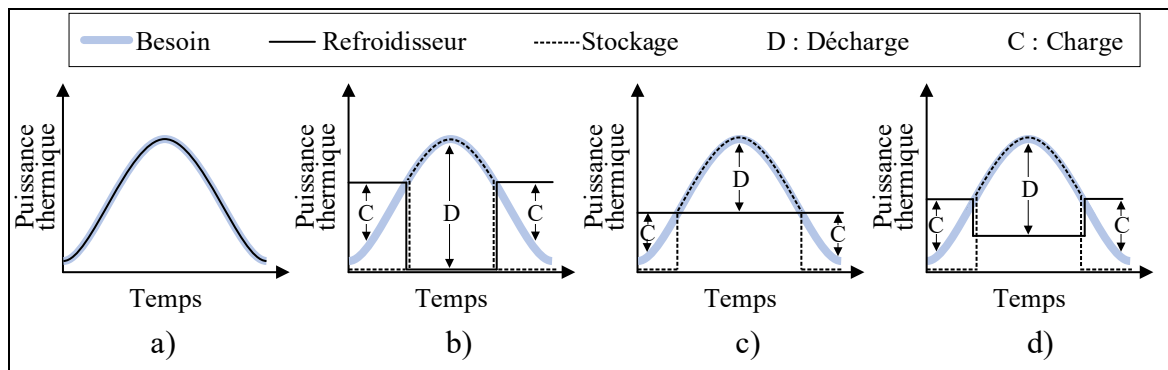


Figure 1.1 Stratégies typiques d'opération d'un système de stockage thermique
Reproduite et adaptée d'Arteconi, Hewitt, & Polonara (2012, p. 378), avec autorisation

La stratégie a) utilise uniquement le refroidisseur pour combler le besoin thermique, par exemple lorsque le système de stockage est hors service. La stratégie b) utilise le système de stockage pour combler entièrement le besoin en période de pointe. Le refroidisseur est délesté durant cette période. Les stratégies c) et d) utilisent quant à elles les deux équipements en période de pointe. La stratégie c) uniformise la puissance thermique fournie par le refroidisseur en chargeant le système de stockage en période creuse et en le déchargeant en période de pointe, alors que la stratégie d) l'augmente durant les périodes creuses et la réduit partiellement en période de pointe.

Des stratégies similaires permettent de contrôler un système de chauffage combinant une chaudière électrique à eau chaude et un ATC hydronique. La Figure 1.1 a) correspond à un scénario sans ATC où une chaudière électrique comble l'entière des besoins thermiques et engendre un profil de demande d'électricité équivalent. Contrôler l'opération d'un ATC avec une des stratégies illustrées par la Figure 1.1 b) à d) modifie le profil de puissance thermique fournie par la chaudière et permet un déplacement de la demande d'électricité de celle-ci, tel qu'illustré par la figure c) du Tableau 1.1. Le défi d'élaborer et d'implanter des séquences de contrôle robustes, mis de l'avant au début de cette sous-section, prend tout son sens étant donné qu'elles doivent anticiper les besoins thermiques à combler et s'assurer de déplacer ou de niveler la demande d'électricité au bon moment et en quantité suffisante pour charger le système de stockage. Les stratégies d'opération retenues pour combler les besoins thermiques permettent de dimensionner les équipements. Par conséquent, le lien est assez étroit entre la conception, les séquences de contrôle implantées lors de la mise en service, le suivi de l'opération des systèmes et l'atteinte des bénéfices visés.

1.1.3 Conception

La conception du système de chauffage d'un bâtiment nécessite de dimensionner tous les équipements en vue de leur installation, dont le système de stockage thermique. La quantité d'énergie à stocker est le paramètre principal du dimensionnement du système de stockage thermique, ce qui est étroitement lié aux stratégies d'opération retenues et à la gestion de la demande visée. Le profil de besoins thermiques à combler est essentiel à ce dimensionnement, tel que mentionné dans plusieurs guides dont celui de Glazer (2019) et celui de l'ASHRAE (2020d). Ces guides recommandent d'utiliser un **profil de besoins thermiques spécifique à chaque bâtiment, représentatif des variations journalières et idéalement saisonnières**. La résolution temporelle de ce profil est importante, étant donné que le concepteur doit évaluer à la fois la puissance thermique et l'énergie totale à fournir, puisque le système de stockage doit préalablement se charger. Les cycles de charge-décharge à court terme (p. ex. journaliers) d'un ATC hydronique demandent d'avoir une résolution temporelle conséquente. Dans les bâtiments existants, cela peut être un **défi d'établir un profil avec une telle résolution si la**

seule information disponible est des factures mensuelles de consommation d'énergie. Le guide de l'ASHRAE (2020d) recommande de l'établir à partir de mesurage direct ou de calculs réalisés à partir de données d'opération provenant du système de gestion du bâtiment plutôt que par estimation. Il est à noter que ces deux guides sont destinés à des applications de climatisation avec du stockage de glace ou d'eau glacée, mais leurs recommandations s'appliquent à des applications de chauffage, puisque les étapes de conception demeurent les mêmes.

Dans leur ouvrage, Dinçer et Rosen (2021) mettent de l'avant le fait que les méthodes de dimensionnement actuellement proposées pour les systèmes de stockage thermique sont partielles et mènent fréquemment à du sous ou du surdimensionnement. Pour pallier cette lacune, il est **essentiel de connaître la capacité du système à fournir de la puissance et de l'énergie thermique pour diverses conditions**, telle que définie par Glazer (2019) comme étant la « capacité actuelle utilisable » d'énergie stockée. Comme plusieurs systèmes de stockage fonctionnent avec des échangeurs de chaleur (p. ex. ATC hydronique, réservoir d'eau chaude, de glace ou d'eau glacée), cette capacité dépend de la quantité d'énergie stockée et peut différer des conditions nominales spécifiées par le fabricant. L'Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI, 2017) recommande de valider la conception par un bilan d'énergie, par exemple heure par heure pour du stockage journalier, en utilisant le profil de besoins thermiques de la journée concordant avec les conditions de conception retenues. Cette validation permet de s'assurer que les besoins thermiques sont comblés lors de cette journée critique et de quantifier le potentiel de déplacement ou de nivelage de la demande, requis pour évaluer la rentabilité du système. En conception, il faut donc pouvoir établir un profil de besoins thermiques à combler et pouvoir évaluer la capacité actuelle utilisable du système pour une quantité donnée d'énergie thermique stockée. Ce second requis nécessite une caractérisation adéquate des échanges thermiques qui sont spécifiques à chaque système, notamment dans la documentation technique du fabricant. La prochaine section présente plus en détail les caractéristiques de l'ATC hydronique disponibles dans la littérature.

1.2 L'accumulateur thermique électrique centralisé

La Figure 1.2 a) montre un ATC hydronique et les briques réfractaires qu'il contient. Ce mémoire de recherche se concentre sur cet équipement de stockage thermique électrique. Lors de la charge, des éléments chauffants élèvent la température des briques, ce qui permet de stocker de l'énergie thermique sensible. Des relais à semi-conducteurs (SSR, pour *solid-state relay* en anglais) modulent la puissance électrique consommée par ces éléments chauffants. Cette puissance influence le temps de charge requis pour stocker la quantité d'énergie ciblée.

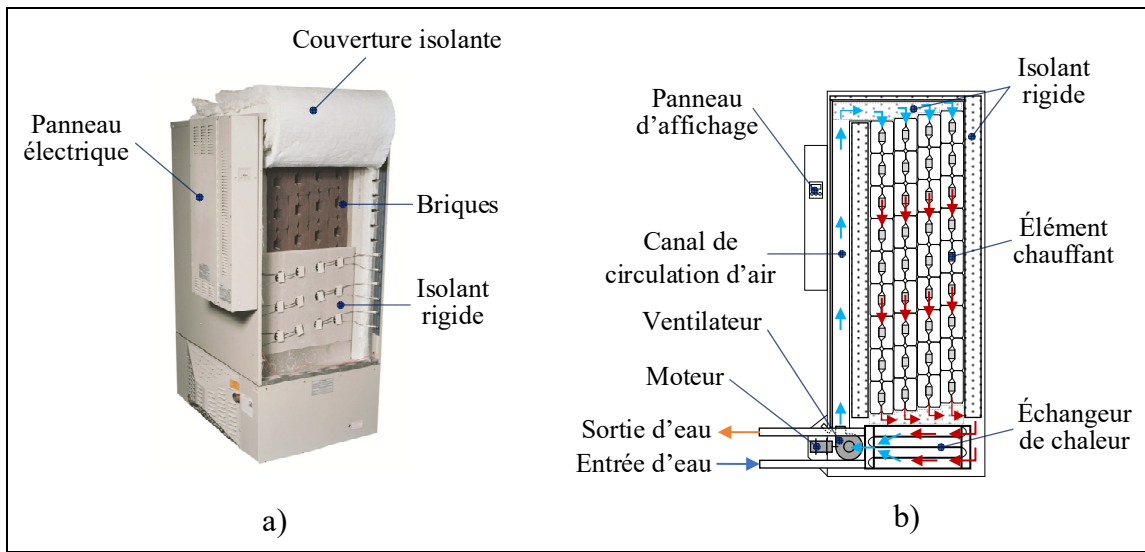


Figure 1.2 Accumulateur thermique électrique centralisé hydronique (ThermElect)
 a) Adaptée de Steffes (2022); b) Reproduite et adaptée de Steffes (s.d.c, p. 5), avec autorisation

Les parois externes de l'ATC comportent différentes couches d'isolant afin de limiter l'autodécharge. Dans ce mémoire, on utilise le terme « pertes thermiques » pour quantifier l'autodécharge de l'ATC hydronique. Sur les parois latérales, un panneau d'isolant rigide est apposé devant les briques et une couverture isolante en fibre de verre les recouvre. Cette couverture isolante doit être repliée sur le dessus de l'ATC pour accéder aux briques, comme montré sur la Figure 1.2 a). La rangée supérieure de briques est recouverte par un bloc d'isolant rigide et par la couverture isolante.

Pour décharger l'énergie stockée, un ventilateur situé sous les briques fait circuler l'air contenu dans l'ATC de bas en haut dans le canal de circulation situé sur le côté gauche de la Figure 1.2 b), puis au travers des briques de haut en bas, ce qui permet d'en extraire la chaleur stockée. L'air réchauffé transmet ensuite son énergie thermique à l'eau de chauffage en passant dans un échangeur de chaleur air-eau à tubes et ailettes. La pompe de l'ATC fait circuler l'eau dans cet échangeur et décharge ainsi l'énergie thermique dans le réseau hydronique. La pompe a un moteur à vitesse constante. Le ventilateur a quant à lui un moteur à vitesse variable, permettant de moduler le débit d'air qui circule à l'intérieur de l'ATC afin de maintenir le point de consigne de température de l'eau en sortie de l'échangeur.

L'ATC peut se charger et se décharger simultanément, à des puissances différentes. Il a donc quatre états possibles : charge seule, décharge seule, charge et décharge simultanées, attente.

1.2.1 Historique et installations existantes

L'ATC a été développé par le Laboratoire des technologies de l'énergie d'Hydro-Québec à partir de 2001, puis fabriqué par le manufacturier Steffes Corporation®. Les premières installations ont commencé en 2004, avec une version à air forcé, puis avec la version hydronique présentée sur la Figure 1.2 en 2006 (Moreau & Lemay, 2007). Dans la version à air forcé, l'ATC se décharge en faisant circuler de l'air du système central de ventilation du bâtiment au-travers des briques. Le développement de l'ATC, à air forcé et hydronique, et ces installations pilotes ont été réalisés tout juste avant l'abolition du tarif biénergie pour la clientèle C&I au Québec. Ce changement d'offre tarifaire pouvait augmenter les coûts d'électricité pour cette clientèle, particulièrement ceux associés à l'appel maximal de puissance. Lorsque ce dernier excède 50 kW, les tarifs M ou G9 s'appliquent aux coûts respectifs de 14,770\$ et de 4,285\$ par kilowatt de puissance **maximale** appelée pour chaque période de facturation (Hydro-Québec, 2021). D'autre part, la puissance **minimale** facturée est fixée à 65% de l'appel **maximal** de puissance entre le 1^{er} décembre et le 31 mars de chaque année. Une telle structure tarifaire incite à gérer la demande d'électricité durant l'hiver par diverses méthodes dont celles présentées précédemment dans le Tableau 1.1, comme la mise

en œuvre d'ATC pour déplacer la demande liée au chauffage. D'autres structures tarifaires encouragent le déplacement de la demande, comme les tarifs qui varient selon le moment de la journée et de l'année (*Time-of-use tariffs*, en anglais). De tels tarifs ne sont pas disponibles actuellement au Québec pour la clientèle C&I, mais ils sont offerts par d'autres services publics et couramment considérés dans la littérature.² Ces tarifs établissent à l'avance le moment de la journée où le coût unitaire d'énergie (\$/kWh) est plus faible, ce qui permet d'établir une stratégie de contrôle chargeant l'ATC à ce moment et le déchargeant lorsqu'il est plus élevé. Ces tarifs sont souvent offerts à la clientèle résidentielle, d'où le fait que la majorité des études sur les ATC portent sur ce secteur plutôt que le C&I.

Moffet, Sirois, Joos et Moreau (2012) ont simulé l'impact qu'aurait l'installation d'ATC à air forcé dans des bâtiments résidentiels au Québec, à la fois sur les coûts de chauffage et sur le réseau électrique.³ Les résultats montrent que les économies sont substantielles pour les consommateurs, bien qu'étroitement liées aux différents tarifs considérés, notamment *Time-of-use*. Cette étude montre qu'à partir d'un certain nombre d'installations d'ATC sur le réseau de distribution d'un quartier donné, évalué à 800 sur 20 000 résidences (4%), la demande déplacée en période hors pointe peut atteindre une demande équivalente à celle en période de pointe visant à être réduite. Autrement dit, le service public doit établir un nombre maximal d'ATC par réseau de distribution. Cet effet rebond pourrait être atténué en offrant des incitatifs financiers ou en imposant des pénalités pour limiter la demande **maximale** déplacée, ce qui n'a pas été considéré dans l'étude. Pour la clientèle C&I qui paie pour l'appel **maximal** de puissance (\$/kW), les consommateurs n'ont pas intérêt à ce que la demande déplacée en période hors pointe excède leur demande en période de pointe, ce qui limite un tel effet rebond pour le service public. Moffet et al. (2012) mettent justement de l'avant l'importance

² Il est à noter que des tarifs sont disponibles sur demande pour la clientèle C&I au Québec (p. ex. Flex G, Flex G9, Flex M) qui s'apparentent à, mais ne constituent pas, des *time-of-use tariffs* au sens de ceux couramment retrouvés dans la littérature. Ces tarifs varient selon les « événements de pointe critique » d'Hydro-Québec, totalisant au plus 100 h durant l'hiver (Hydro-Québec, 2021), et non selon une base récurrente, p. ex. journalière comme la plupart des *time-of-use tariffs*. Ces tarifs « Flex » peuvent tout de même mener à des économies, puisque le coût unitaire d'énergie (\$/kWh) hors des événements de pointe critique d'Hydro-Québec est plus bas que celui des tarifs analogues G, G9 et M qui ne sont pas impactés par ces événements.

³ Ces ATC sont différents de celui à air forcé adapté aux bâtiments C&I introduit au début de la présente section.

d'implanter une structure tarifaire et une stratégie de contrôle permettant de partager les bénéfices entre le service public et les consommateurs et limitant le plus possible les effets rebonds. Sans cela, l'intégration du stockage thermique électrique risque d'être freinée, d'un côté comme de l'autre, ce qui est une barrière à son adoption.

Une structure tarifaire et une stratégie de contrôle spécifiquement adaptées au stockage thermique électrique ont été implantées à l'Île-du-Prince-Édouard, au Canada, dans le cadre d'un programme de gestion de la demande offert aux secteurs résidentiel et commercial. Elles incluaient : des *time-of-use tariffs*, des banques d'énergie électrique offertes à coût réduit pour charger les systèmes et un signal envoyé par le service public pour le contrôle des systèmes résidentiels lors des périodes de pointe, lorsque l'interconnexion était déjà disponible. Ce programme a mené à l'installation d'ATC, à air forcé et hydronique, dans ces deux secteurs. Wong, Gaudet et Proulx (2017) ont étudié l'impact du programme sur l'utilisation des surplus d'électricité éolienne. Les résultats de l'étude montrent qu'en 2015 : les surplus annuels ont été réduits de 17%; les consommateurs ont pu remplacer leurs systèmes de chauffage au mazout par du stockage thermique électrique réduisant les émissions totales de GES de 407 tCO₂éq; et ils ont économisé en moyenne 37% sur leur coût annuel de chauffage de 3 800\$. Ces résultats témoignent du potentiel du nivelage de la demande pour utiliser les surplus d'électricité, au moment où ils sont disponibles, afin de décarboner le chauffage. Ces résultats incluent les systèmes dédiés au secteur résidentiel uniquement, bien que les ATC dédiés au secteur commercial représentent 21% de la capacité totale de stockage de 13 590 kWh installée en 2015. Ces ATC dédiés au secteur commercial n'étaient contrôlés que par les consommateurs, d'où le fait qu'ils n'ont pu être inclus dans les résultats de l'étude. Cet exemple réitère le besoin de documenter les impacts d'installations d'ATC dans le secteur C&I, tant pour le déplacement que le nivelage, ainsi que les stratégies de contrôle implantées. La littérature témoigne pourtant d'installations existantes dans le secteur institutionnel qui peuvent servir de point de départ.

Un inventaire des technologies de stockage thermique a répertorié des ATC dans 52 de 156 (33%) bâtiments de CSS du Québec (Ido, 2020). À l'exception d'un bâtiment, ces ATC sont

tous hydroniques. Les bâtiments répertoriés datent pour la plupart d'entre 50 et 69 ans, ce qui est relativement âgé, et utilisaient du combustible pour le chauffage avant la mise en œuvre du stockage thermique. Ces ATC hydroniques ont donc été installés pour faire une transition énergétique de réseaux de chauffage conçus pour être opérés dans des plages de température de l'ordre de 70 à 90°C (ASHRAE, 2020b), telles qu'avec une chaudière au combustible (p. ex. mazout). De plus, cet inventaire indique que des CSS songent à recourir à court terme au stockage thermique dans 21 autres bâtiments, dont des ATC hydroniques dans 9 d'entre eux. Des présentations faites lors de colloques et la base de données du Système électronique d'appel d'offres du Gouvernement du Québec (SEAO) témoignent aussi d'installations d'ATC hydroniques dans d'autres types de bâtiments institutionnels que les écoles primaires et secondaires : centres communautaires, bibliothèques municipales, hôtels de ville, palais de justice et édifices gouvernementaux (Ville de Québec, 2019). A priori, ces bâtiments institutionnels ont en commun des horaires d'occupation permettant d'utiliser la puissance électrique disponible durant la nuit, alors qu'ils ne sont vraisemblablement pas occupés et que des équipements électriques peuvent être délestés. Ces données indiquent que l'ATC hydronique est une option adaptée à la décarbonation de réseaux de chauffage existants de divers types de bâtiments institutionnels. Il y a donc lieu de cerner les conditions de mise en œuvre et de quantifier la performance d'ATC hydroniques déjà installés en vue de faciliter l'intégration à d'autres bâtiments. Pour revenir sur les conclusions tirées précédemment, il faut pour cela une connaissance adéquate des caractéristiques de l'ATC hydronique.

1.2.2 Caractéristiques de l'ATC hydronique

Cette sous-section présente les principales caractéristiques des composants de l'ATC hydronique disponibles dans la littérature, tant dans la documentation technique du manufacturier que celle issue du domaine scientifique. Cette revue est nécessaire puisque, comme mentionné par Belzile (2012, p. 6), il y a un besoin d'avoir une connaissance approfondie de ces caractéristiques pour maîtriser le fonctionnement de l'ATC hydronique. Le Tableau 1.2 présente les principales spécifications des deux modèles disponibles d'ATC hydroniques : un d'une puissance électrique nominale de 53,3 kW et l'autre de 80,0 kW. Les

valeurs indiquées proviennent du manuel d'utilisation le plus récent du manufacturier (Steffes, s.d.d), à l'exception des valeurs entre parenthèses tirées des documents indiqués au bas du tableau. Ces écarts soulignent les disparités dans la documentation technique disponible pouvant être liées à des changements apportés aux composants. Le modèle de 80 kW est semblable à celui de 53 kW montré sur la Figure 1.2 a), à l'exception qu'il est plus haut, ce qui lui permet de contenir plus de briques et d'éléments chauffants. La terminologie propre au contrôleur de l'ATC qui sera abordée au paragraphe 1.2.2.6 définit un « noyau » comme étant trois étages de briques superposées. Le modèle de 80 kW comprend trois noyaux, alors que celui de 53 kW en comprend deux. La puissance électrique nominale, la capacité de stockage et la masse de briques du modèle de 80 kW sont ainsi 1,5 (3/2) fois supérieures à celles du 53 kW. L'ATC peut chauffer l'eau jusqu'à entre 85 à 91°C, ce qu'ASHRAE (2020a) catégorise comme de la « basse température », par rapport au chauffage avec de la vapeur.

Tableau 1.2 Principales spécifications techniques de l'ATC hydronique
Adapté de Steffes (s.d.d, pp. 21-22)

Modèle	9150 (53 kW _e)	9180 (80 kW _e)
Énergie stockée dans les briques à 760°C (kWh)	290	440
Nombre de paires d'éléments chauffants	12	18
Nombre de noyaux de briques	2	3
Puissance électrique maximale de charge (kW)	53,3	80,0
Puissance électrique nominale d'un noyau (kW)	26,7	
Pertes thermiques maximales (charge ou attente) (kW)	3,0	4,5
Débit maximal d'eau (USGPM) [L/s]	30 [1,89]	
Température de l'eau à la sortie de l'échangeur minimale – maximale (°C)*	10 – 85 (7-91)	
Masse approximative de briques (kg)**	1 442 (1 560)	2 162 (2 341)
Masse totale approximative (kg)**	2 023 (2 118)	2 860 (2 962)
Dimensions extérieures : largeur x profondeur (m)	1,30 x 0,864	
Hauteur (m)	1,96	2,49
*Les valeurs indiquées entre parenthèses proviennent du document <i>Master Supplemental Installer's Guide for Comfort Plus Commercial and ThermElect</i> (Steffes Corporation, s.d.a).		
**Les valeurs indiquées entre parenthèses proviennent de la fiche technique (Steffes, s.d.b) et apparaissent dans la version antérieure du manuel d'utilisation (Steffes, s.d.c). Ce sont celles utilisées dans ce mémoire.		

Dans ce qui suit et jusqu'à la fin de cette sous-section, les composants suivants sont discutés : matériau de stockage, isolation thermique, éléments chauffants, moteur du ventilateur, échangeur de chaleur, contrôleur et sondes de température.

1.2.2.1 Matériau de stockage

Les briques réfractaires de l'ATC sont en céramique, composée de magnésite (Date, Candanedo, Athienitis, & Lavigne, 2020) et d'hématite (Fe_2O_3) (Moreau & Steffes, 2009). L'hématite augmente la conductivité thermique des briques, qui vaut environ $4,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Date et al., 2020). Leur densité est d'environ $4\,200 \text{ kg/m}^3$ (Lavigne, 2006) et leur capacité thermique massique de $0,92 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (Moreau, 2015), ce qui résulte en une capacité thermique volumique de $3\,860 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$, soit 8% inférieure à celle de l'eau qui vaut $4\,180 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$.⁴ Or, les briques peuvent résister à une température allant jusqu'à 900°C (Moreau & Steffes, 2009), ce qui augmente considérablement la densité de stockage d'énergie comparativement à celle de l'eau contenue dans un réservoir sous pression qui peut être chauffée jusqu'à environ 140°C (ASHRAE, 2020d). Moreau et Dion (2010) ont évalué la densité de stockage d'énergie des briques à 859 kWh/m^3 , comparativement à 70 kWh/m^3 pour l'eau d'un réservoir sous pression.⁵ Pour stocker une même quantité absolue d'énergie, le volume d'eau requis serait 12 fois supérieur à celui des briques. Un matériau avec une densité de stockage d'énergie élevée contribue à réduire la taille du système, ce qui facilite son installation dans les bâtiments existants où l'espace est restreint. De plus, une densité élevée de stockage d'énergie réduit la surface de contact avec l'air ambiant et par conséquent, les pertes thermiques. La température des briques et l'isolation des parois de l'ATC influencent aussi les pertes thermiques, c'est-à-dire sa capacité de maintenir l'énergie stockée.

1.2.2.2 Isolation thermique

Les pertes thermiques maximales de l'ATC spécifiées par le fabricant sont de $3,0 \text{ kW}$ et de $4,5 \text{ kW}$ pour le modèle de 53 kW et de 80 kW respectivement, lorsque l'ATC est en charge ou en attente (c.-à-d. lorsque le ventilateur est à l'arrêt) et que la température des briques est de 760°C (voir Tableau 1.2). La documentation du fabricant ne comprend aucune

⁴ La composition des briques a changé au fil des années (A. Moreau, communication personnelle, 9 déc. 2021). Leurs propriétés physiques et thermiques, dont la densité, peuvent donc varier selon les diverses versions d'ATC.

⁵ En supposant que les briques sont refroidies jusqu'à 100°C et que l'eau sous pression est refroidie jusqu'à 80°C .

indication sur la méthode employée pour quantifier ces pertes maximales ni le recours à une norme. Ces valeurs sont des pertes maximales instantanées, alors que les pertes se produisant durant une saison de chauffage varient selon la température des briques et les conditions ambiantes. Ces valeurs ne sont donc pas suffisantes pour évaluer les pertes thermiques saisonnières. La sous-section 1.3.4 présentera différentes méthodes pour estimer les pertes thermiques de l'ATC.

1.2.2.3 Éléments chauffants

Les orifices laissés libres par la forme des briques permettent d'insérer les éléments électriques chauffants, comme montré sur la Figure 1.3 a) et b). Ces éléments chauffants sont relativement fragiles, puisqu'une céramique diélectrique sert d'isolant électrique et de support aux fils chauffants. Ils sont ouverts, sans protection mécanique externe. La Figure 1.3 c) montre les plaques de céramique apposées devant chaque élément chauffant qui maintiennent les connexions et préviennent les courts-circuits. Le fabricant recommande diverses précautions à prendre lors de l'installation ou du remplacement des éléments chauffants (Steffes, 2016), ce qui indique qu'une formation adéquate est requise pour la mise en service et la maintenance. Un guide technique, disponible sur demande au fabricant, dresse un lien clair entre la durée de vie des éléments chauffants et l'exposition à des températures de briques élevées pendant des périodes prolongées (Steffes Corporation, s.d.b). La Figure 1.4 montre la durée de vie attendue des éléments chauffants, exprimée en pourcentage d'éléments à remplacer chaque dix ans, en fonction de la température de briques **maintenue**. Ainsi, en maintenant une température de briques de 760°C, la température maximale recommandée pour une utilisation comme source principale de chauffage, 60% des éléments seront à remplacer après 10 ans. Une période prolongée sans décharge et à température élevée de briques sollicite donc inutilement les éléments chauffants. La séquence de contrôle, plus spécifiquement la consigne de température des briques, a un impact majeur sur la durée de vie des éléments chauffants. Les concepteurs et les opérateurs devraient ainsi y porter une attention particulière. Par ailleurs, ce guide technique ne donne aucune indication sur la méthode employée pour

établir la courbe montrée sur la Figure 1.4, ni le recours à une norme, ce qui ne permet pas de savoir sur quel type de caractérisation elle repose (p. ex. essais standards).

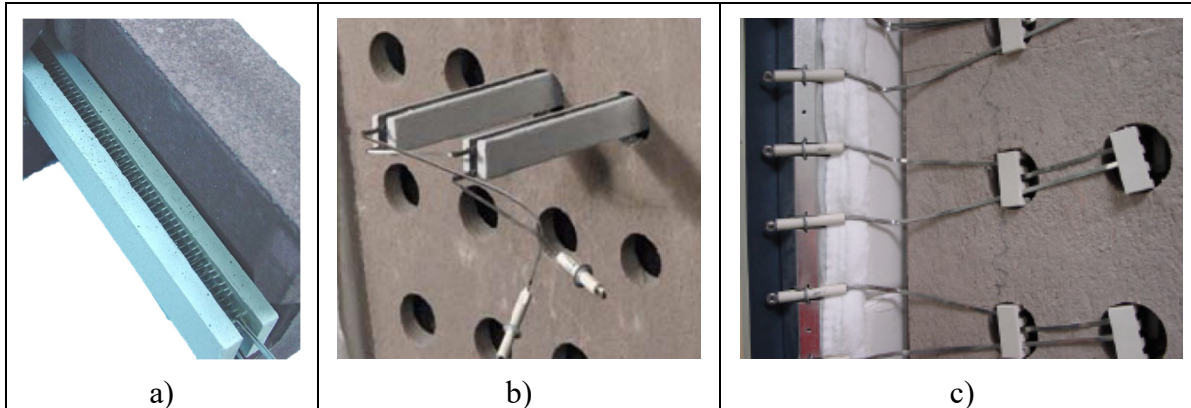


Figure 1.3 Éléments chauffants et isolant diélectrique en céramique
 a) Adaptée de Desbiens & Groupe Master (2016); b) Tirée de Steffes (2016, p. 3);
 c) Tirée de Steffes (s.d.c, p. 14)

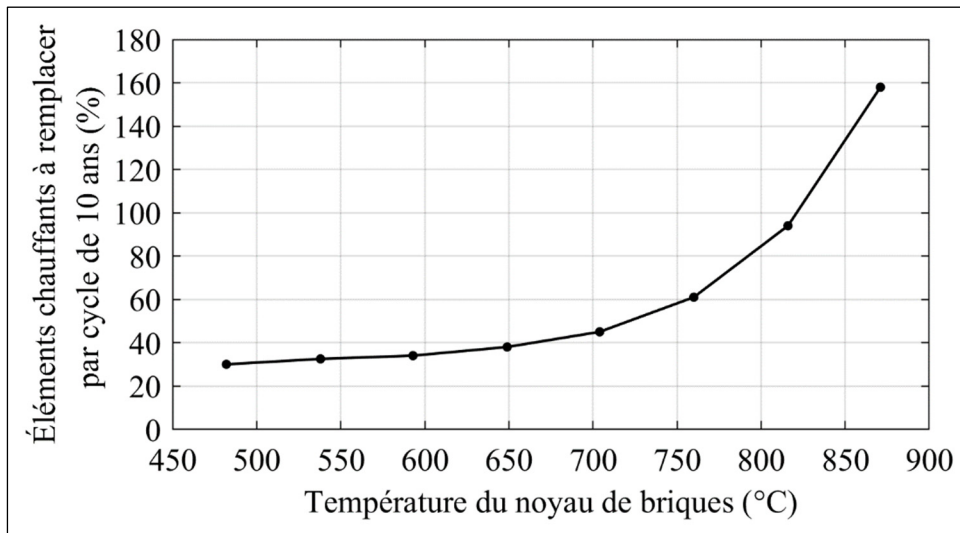


Figure 1.4 Remplacement attendu d'éléments chauffants par cycle de 10 ans
 Reproduite et adaptée de Steffes Corporation (s.d.b, p. 2), avec autorisation

La Figure 1.3 c) montre que la rangée verticale d'éléments chauffants située sur chaque côté de l'ATC est raccordée en série avec la rangée adjacente, formant une paire. Chaque noyau de briques comporte six paires. Selon les versions d'ATC, différents composants contrôlent la

puissance électrique consommée par les éléments chauffants. Les premières versions utilisaient exclusivement des relais électromécaniques (Steffes, s.d.c) dans lesquels une pièce mobile ouvre et ferme le circuit électrique et dont la durée de vie dépend du nombre de cycles. Le manufacturier a ensuite proposé l'option d'ajouter un panneau externe de relais SSR, lesquels sont exempts de pièce mobile, modulent plus rapidement la puissance électrique et réduisent le nombre de cycles des relais électromécaniques (Steffes, s.d.a). Dans la version la plus récente, fabriquée après juin 2020, des relais SSR sont intégrés à même le panneau électrique de l'ATC et alimentent en parallèle deux paires d'éléments (Steffes, s.d.d). Le raccordement électrique des éléments, leur fragilité et leur sensibilité à des températures élevées maintenues de manière prolongée font en sorte qu'une défaillance d'un élément de la paire ou des deux éléments peut mener à une sollicitation plus importante des autres paires, réduisant conséquemment leur durée de vie. Le dysfonctionnement partiel de l'ATC peut alors passer graduellement vers un dysfonctionnement plus généralisé. Ces défaillances peuvent en outre créer des zones où les briques sont à une plus basse température, rendant plus difficile de charger complètement l'ATC. La littérature ne contient pas de données probantes sur la fréquence de ces défaillances ni sur l'opération associée de l'ATC.

1.2.2.4 Moteur du ventilateur

Le moteur du ventilateur est à courant alternatif monophasé avec un condensateur auxiliaire permanent (*permanent-split capacitor (PSC) motor*, en anglais), dont la tension d'alimentation est modulée par un thyristor triode bidirectionnel (TRIAC) (Steffes, communication personnelle, 5 novembre 2020).⁶ Ce type de moteur est couramment employé dans les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA) (ASHRAE, 2015), donc commun pour le personnel d'opération et de maintenance. Le condensateur est continuellement sollicité lors de la décharge de l'ATC, ce qui justifie une inspection périodique par exemple en mesurant sa capacitance.

⁶ Des changements ont été apportés au ventilateur et au moteur par le manufacturier dans les dernières années. Il se peut donc que des détails varient selon les diverses versions d'ATC (Steffes, s.d.d, p. 26).

Le TRIAC module la tension d'alimentation, variant entre 0 et 240 V, proportionnellement à la consigne de vitesse, variant entre 0 (0%) et 255 (100%). La relation entre la tension d'alimentation et la vitesse de rotation est non linéaire, comme montré par la courbe V_m sur la Figure 1.5 qui a été établie pour un moteur et un contrôleur de mêmes types. La relation entre la consigne de vitesse (0-100%) et le débit d'air est elle aussi non linéaire et a la même forme que la courbe V_m , puisque les lois d'affinité des ventilateurs stipulent que la vitesse de rotation et le débit d'air sont directement proportionnels (ASHRAE, 2020c). Cette non-linéarité entre la consigne et le débit rend le contrôle de ce type de moteur imprécis et sujet à des instabilités lorsqu'il n'opère pas à sa vitesse nominale. Les renseignements disponibles sur le moteur et son contrôleur ne permettent pas de tirer davantage d'information de la littérature.

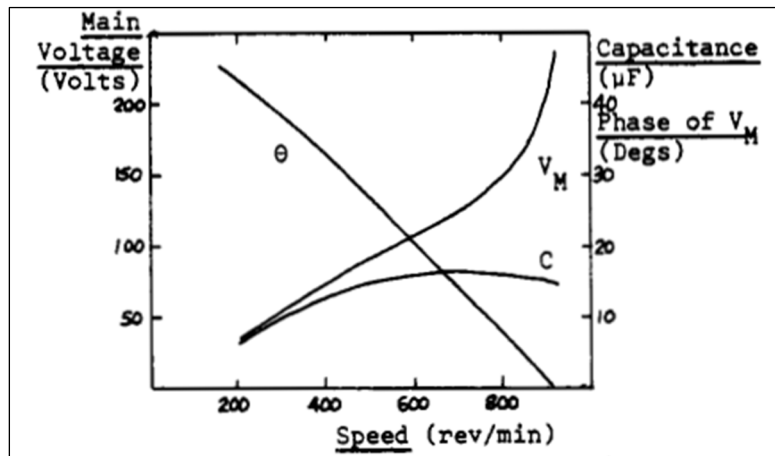


Figure 1.5 Courbe de vitesse de rotation (*Speed*) d'un moteur PSC dont la tension d'alimentation (V_M) est modulée par un TRIAC
Tirée de Cattermole & Davis (1975, p. 787) Copyright ©, IEEE

1.2.2.5 Échangeur de chaleur

Quelques spécifications sur l'échangeur de chaleur figurent dans la documentation du fabricant, entre autres le débit maximal d'eau, les pertes de charges et la température maximale de l'eau en sortie (Steffes, s.d.d). Toutefois, ces spécifications sont insuffisantes pour estimer la puissance thermique ($\dot{Q}_{Déch}$) que l'ATC peut fournir, car elle dépend principalement de : l'énergie stockée dans les briques (Q_{stock}); la densité (ρ), le débit volumique

(\dot{V}) et la capacité thermique massique (C_p) de l'eau et de l'air; le coefficient d'échange global (U) entre les briques et l'air et entre l'air et l'eau dans l'échangeur de chaleur; la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur ($T_{in,ATC}$). L'équation (1.2) exprime cette relation.

$$\dot{Q}_{Déch} = (\rho\dot{V}C_p)_{eau} \cdot \Delta T_{eau}$$

$$\text{où } \Delta T_{eau} = f(Q_{stock}, (\rho\dot{V}C_p)_{eau}, (\rho\dot{V}C_p)_{air}, U, T_{in,ATC}) \quad (1.2)$$

Adaptée de Bergman, Lavine, Incropera, & Dewit (2011, pp. 711-725)

Une ancienne version de la fiche technique de l'ATC (Steffes Corporation, s.d.c) et un article publié par Moreau et Steffes (2009) montrent des courbes empiriques exprimant la puissance thermique fournie en kW en fonction du temps de décharge en heures. La Figure 1.6 montre ces courbes pour le modèle de 53 kW, à gauche, et de 80 kW, à droite.

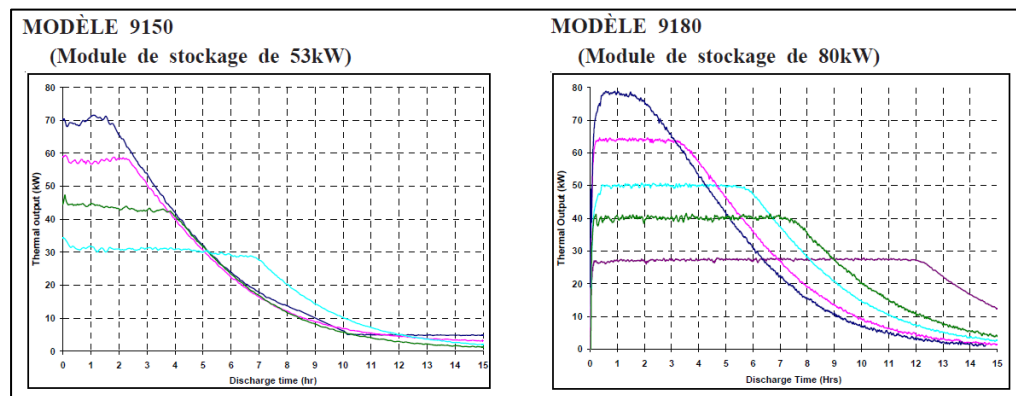


Figure 1.6 Courbes de décharge disponibles des deux modèles d'ATC hydroniques indiquant la puissance thermique fournie (kW) en fonction du temps (h)
Tirée de Steffes Corporation (s.d.c, p. 1)

À première vue, ces courbes indiquent que l'ATC peut combler différents profils de besoins thermiques en modulant la vitesse du ventilateur selon la quantité d'énergie stockée dans les briques. De telles courbes ne renseignent pas directement un concepteur qui doit savoir à quelle quantité d'énergie stockée (c.-à-d. à quelle température de briques) ces puissances fournies correspondent. Il n'y a pas non plus d'indications sur les températures d'entrée et de sortie de l'eau, ni sur le débit fourni par la pompe. Belzile (2012) a intégré ces courbes de puissance

thermique fournie en fonction du temps pour estimer la capacité de décharge ($\dot{Q}_{Déch}$) en fonction de l'énergie stockée (Q_{stock}). Sa méthode repose sur deux hypothèses : elle néglige les pertes thermiques et elle sous-estime l'énergie qui demeure stockée à la fin de la décharge, c'est-à-dire l'énergie « résiduelle ». Belzile (2012) a donc quantifié l'énergie thermique « utilisable » (voir sous-section 1.1.3), équivalent à l'énergie thermique **fournie**, et non l'énergie **totale qui doit être stockée** lors de la charge. Ainsi, la méthode utilisée par Belzile résulte en des quantités initiales d'énergie stockée différentes pour chacune des courbes de décharge montrées sur la Figure 1.6, alors que Moreau (2015) qui a réalisé ces essais expérimentaux mentionne qu'elles sont similaires. Ces courbes ne renseignent pas non plus sur l'influence potentielle du débit d'eau et de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur sur la puissance thermique fournie. Il manque donc des informations probantes dans la littérature sur la puissance que l'ATC peut fournir dans diverses conditions d'opération. Cette puissance doit être évaluée lors de la conception, puisqu'il n'est pas réaliste de supposer que l'ATC sera toujours pleinement chargé avant chaque décharge. Il est donc requis d'évaluer la capacité de décharge à différentes quantités d'énergie stockée, la capacité actuelle utilisable d'énergie stockée, tel que mentionné dans la sous-section 1.1.3. De plus, le paragraphe 1.2.2.3 a montré l'impact d'exposer inutilement les éléments chauffants à des températures élevées, ce qui appuie la nécessité de stocker la quantité adéquate d'énergie en fonction des besoins à combler.

1.2.2.6 Contrôleur et sondes de température

Le contrôleur automatise l'opération de l'ATC hydronique en fonction des paramètres configurés et des consignes qui lui sont demandées. Un panneau d'affichage permet de modifier les canaux de configuration de ce contrôleur (CLoc, *Configuration Location*, en anglais) et d'afficher les canaux de lecture des valeurs actuelles (RLoc, *Read Only Location*, en anglais). Il est également possible de contrôler à distance l'ATC en installant l'interface optionnelle qui utilise le protocole de communication BACnet™ et qui s'intègre à un système de gestion du bâtiment (BMS, *Building Management System*, en anglais).

Le document *Master Supplemental Installer's Guide for Comfort Plus Commercial and ThermElect* (Steffes Corporation, s.d.a) donne la signification, les valeurs programmées par défaut et les valeurs possibles des canaux CLoc et RLoc. Ce document fait état de plusieurs modes de contrôle possibles de la charge et de la décharge, ainsi que divers moyens de communiquer les consignes. À la lecture de ce document, il est difficile d'établir les interactions entre les canaux CLoc et de déterminer la priorité d'un canal par rapport à un autre. Le soutien technique du manufacturier, du distributeur ou d'une personne ayant une expérience antérieure avec l'ATC peut donc être requise pour prédire la réponse du contrôleur à une situation donnée selon les valeurs des canaux CLoc. Les études de cas d'installations d'ATC qui ont été publiées ne donnent pas d'information sur le mode de contrôle implanté ni sur les valeurs des canaux CLoc. Dans l'optique de faciliter la mise en œuvre, il s'avère nécessaire de clarifier les modes de contrôle utilisés dans des installations passées et de les lier au comportement observé de l'ATC et à sa performance.

Néanmoins, ce document technique du manufacturier fournit des renseignements importants sur le fonctionnement du contrôleur de l'ATC, entre autres :

- Le contrôleur gère la charge de chaque noyau de briques indépendamment, en se basant sur la température mesurée au centre de ceux-ci.
- Le contrôleur permet le raccordement à une sonde de température extérieure pour établir la consigne de température des briques. La cible d'énergie à stocker est alors fixée selon la température extérieure actuelle, et non selon une prévision. Le document n'indique pas explicitement comment contrôler la consigne de température des briques en fonction d'une prévision de température extérieure, mais il semble que cela soit possible de le faire en activant le mode dénommé « Mode manuel de contrôle de la charge » et une intégration avec le BMS.

La Figure 1.7 montre l'emplacement des sondes de température dans l'ATC qui sont raccordées au contrôleur et les canaux RLoc associés. Un thermocouple est inséré au centre de chacun des noyaux de briques (canaux RLoc137 à 139). Le canal RLoc114 affiche quant à lui la température de l'eau à la sortie de l'échangeur après calibration par la valeur du canal

CLoc014. L'équation permettant de calculer la valeur réellement lue par la sonde ($T_{out,éch}$) est indiquée au bas de la figure. Cette sonde est un thermistor (Steffes, communication personnelle, 5 novembre 2020) installé dans un puits thermométrique (Steffes, s.d.d). Pour un contrôle optimal de la température de l'eau en sortie de l'échangeur, il faudrait ajuster lors de la mise en service la valeur de calibration qui est programmée par défaut au canal CLoc014.

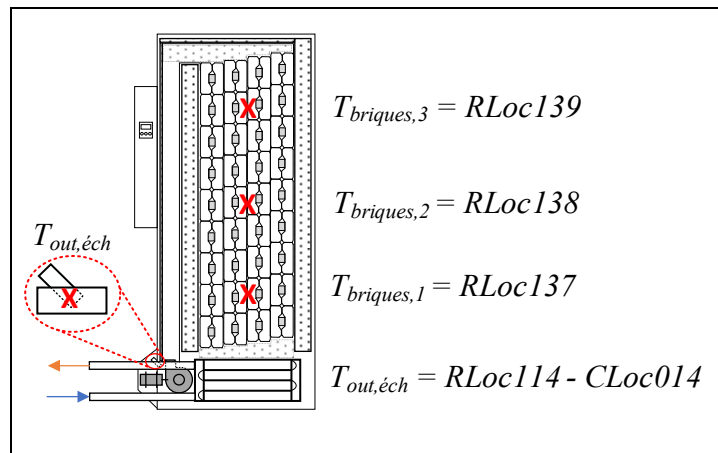


Figure 1.7 Températures mesurées par les sondes de l'ATC et canaux associés

Enfin, comme le contrôleur est compatible avec une interface utilisant le protocole de communication BACnet™, il serait possible de transmettre des données d'opération (p. ex. consignes, valeurs de CLoc et RLoc) à un système de gestion de l'énergie pour faire le suivi de la performance. La documentation du manufacturier, ni la littérature portant sur les installations existantes d'ATC hydroniques ne font référence à une telle application. Pour faire ce suivi, il faut d'abord établir comment évaluer la performance de l'ATC hydronique et à partir de quels indicateurs la quantifier. La prochaine section aborde le mesurage de performance in situ à partir de données mesurées et d'opération.

1.3 Mesurage de performance in situ

Les bénéfices d'intégrer le stockage thermique à un bâtiment mentionnés dans la sous-section 1.1.2 peuvent être exprimés par des indicateurs de nature énergétique (p. ex. : consommation d'énergie, déplacement et nivelage de la demande, rendement), économique (p. ex. : coût d'énergie, coût d'appel de puissance) et environnementale (p. ex. : émissions de GES). Les points de vue différents du service public et du consommateur influencent l'interprétation de ces indicateurs. Au regard des sous-objectifs de ce projet de recherche, ces indicateurs doivent concorder avec le point de vue du consommateur.

Les principales références dans la littérature qui encadrent la quantification de ces indicateurs sont des guides méthodologiques de mesurage et de vérification d'économies et des normes. Le *Protocole international de mesure et de vérification de la performance énergétique* (*International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP), en anglais) (Efficiency Valuation Organization, 2023) est le principal guide méthodologique référencé dans la littérature. Ce protocole définit les étapes à suivre pour quantifier les économies attribuables à une mesure d'efficacité énergétique ou de gestion de la demande en conditions réelles d'opération et pour vérifier que les économies répondent aux exigences (p. ex. contractuelles pour les projets avec économies d'énergie garanties). Le *Guideline 14* d'ASHRAE (2014) reprend les notions de l'IPMVP et donne des exemples d'application. Pour mesurer et vérifier la performance in situ d'un système de stockage thermique, il faut quantifier l'impact énergétique spécifique de celui-ci.⁷ L'IPMVP recommande à cet effet d'utiliser l'option B (US Department of Energy Federal Energy Management Program, 2015), qui requiert minimalement de compléter les deux étapes suivantes :

1. Quantifier les flux d'énergie de l'ATC et la variation d'énergie stockée;
2. Substituer l'ATC par une autre mesure et comparer les indicateurs de performance.

⁷ Isoler l'impact énergétique du système de stockage thermique est inhérent aux objectifs de ce projet de recherche. Dans d'autres cas, il peut s'avérer approprié de mesurer et de vérifier la performance globale qui résulte de la combinaison de plusieurs mesures d'efficacité énergétique et de gestion de la demande sans distinguer l'impact de chacune d'elles. L'IPMVP recommande les options C et D à cet effet.

Les flux d'énergie évoqués à la première étape correspondent à la puissance électrique consommée pour la charge (flux entrant), à la puissance thermique fournie et aux pertes thermiques (flux sortants). La seconde étape requiert de définir au préalable une autre mesure qui aurait pu être retenue au lieu d'opter pour l'ATC, par exemple un autre équipement. Cette autre mesure est incluse dans ce qui est dénommé « un scénario de substitution » dans la suite de ce mémoire. C'est ce scénario qui sert à comparer les indicateurs de performance. Dans certains cas, il peut correspondre à ce qui était déjà en place avant l'installation d'ATC et qui aurait pu être conservé, par exemple une chaudière au gaz naturel qui n'est pas en fin de vie et dont l'usage répond aux exigences de l'exemplarité de l'État.

Quelques normes portent sur l'évaluation de la performance in situ d'équipement de stockage thermique, dont :

- *ANSI/ASHRAE 94.2 : Method of Testing Thermal Storage Devices with Electrical Input and Thermal Output Based on Thermal Performance* (ASHRAE, 2010);
- *ANSI/ASHRAE 94.3 : Method of Testing Active Sensible Thermal Energy Storage Devices Based on Thermal Performance* (ASHRAE, 1990);
- *ANSI/ASHRAE 150 : Method of Testing the Performance of Cool-Storage Systems* (ASHRAE, 2019).

Le point commun aux deux premières normes est qu'elles donnent des méthodes de test de courte durée élaborées spécifiquement pour des ATC.⁸ Ces tests permettent entre autres de s'assurer que l'assemblage de tous les composants mène au fonctionnement et à la performance attendus dans des conditions d'opération précises, les conditions nominales. Ces tests requièrent une installation instrumentée qui doit être consacrée à leur réalisation. Il est possible de les réaliser lors de la mise en service ou d'une remise en service, mais il serait difficile de les réaliser lorsque l'ATC doit continuer à desservir l'application pour laquelle il est destiné pendant le test. Ainsi, il n'est pas possible de se baser uniquement sur ces normes pour atteindre

⁸ Il est à noter que les normes ANSI/ASHRAE 94.2 et ANSI/ASHRAE 94.3 ont respectivement été retirées par ASHRAE en 2020 et en 2014 dû à leur faible utilisation (<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/withdrawn-and-discontinued-projects>).

le second objectif spécifique de ce mémoire. Elles fournissent toutefois un cadre de référence uniforme pour différents types d'ATC et des définitions adaptées à l'évaluation de leur performance, en vue par exemple d'établir les spécifications d'une fiche technique.

La troisième norme porte quant à elle sur les systèmes de stockage thermique utilisés pour la climatisation (p. ex. réservoir de glace ou d'eau glacée) plutôt que sur les ATC. Elle est toutefois plus adaptée que les deux précédentes au mesurage de performance en conditions réelles d'opération, lesquelles diffèrent des conditions nominales. Cette norme définit l'état « pleinement déchargé » qui correspond à l'état auquel la température du matériau de stockage ne peut plus fournir d'énergie thermique utile. L'ATC hydronique présenté à la sous-section précédente est ainsi pleinement déchargé, lorsqu'à une température donnée de briques, il ne fournit plus de puissance thermique utilisable par le réseau de chauffage. Cette température paramétrée par défaut dans le contrôleur vaut 93°C (Steffes Corporation, s.d.a). De la même manière, la norme définit l'état « pleinement chargé » comme étant la température à partir de laquelle la charge est interrompue. Il correspond donc à la température maximale autorisée des briques, dont la valeur recommandée par le fabricant est de 760°C pour une utilisation comme source principale et de 704°C pour une utilisation autre (Steffes Corporation, s.d.b).

Que ce soit pour effectuer les tests définis par ces normes ou bien pour compléter les étapes de l'option B de l'IPMVP, il faut mesurer sur de courts intervalles de temps tous les paramètres requis pour quantifier l'impact énergétique de l'ATC. Ces données peuvent provenir d'historiques de données d'opération extraits de systèmes de contrôle, tel que mentionné dans l'IPMVP (US Department of Energy Federal Energy Management Program, 2015), ou bien être obtenues par du mesurage externe mis en place à cette fin, ce qui est davantage mis de l'avant dans les normes. De plus, l'*ASHRAE Design Guide for Cool Thermal Storage* (Glazer, 2019) mentionne que les historiques de données d'opération sont essentiels, non seulement pour quantifier la performance in situ après la mise en service, mais aussi pour :

- Vérifier que chaque composant du système fonctionne adéquatement;
- Vérifier que le système dans son ensemble fonctionne adéquatement;
- Vérifier que le système rencontre les spécifications et les critères de conception.

Les données d'opération peuvent servir autant au suivi de l'opération, à la planification de la maintenance et à l'amélioration de la conception, ce qui est directement lié à l'objectif principal de ce mémoire. Ces données sont centralisées, souvent via le BMS, donc plus facilement accessibles que des données obtenues en installant temporairement des instruments de mesure. L'idéal est que les données d'opération soient enregistrées à un pas de temps fixe (p. ex. 15 min) et correspondent à la moyenne des valeurs mesurées durant cet intervalle (Glazer, 2019 ; Reddy, Ellesen, & Haberl, 2001). Les données enregistrées en changement de valeur, c'est-à-dire à chaque instant où le changement de valeur détecté est plus élevé que le seuil d'enregistrement, peuvent être converties en valeurs moyennes durant chaque pas de temps.

Ces guides méthodologiques et ces normes encadrent le mesurage de performance in situ, tout en laissant suffisamment de latitude pour que les méthodes proposées puissent être adaptées à chaque cas spécifique de mesurage. Cette latitude mène par le fait même à des flous méthodologiques dans la littérature, particulièrement pour les mesures de gestion de la demande comme les systèmes de stockage thermique. Par exemple, Reddy et al. (2001) mettent de l'avant le besoin de développer des méthodes adaptées au stockage thermique pour évaluer les économies réalisables à long terme (1 an) à partir de mesurage réalisé sur une plus courte période (<1 an). Au moment de réaliser leur projet de recherche pour répondre à ce besoin, il n'existait pas de « méthode spécifiquement établie à cette fin et largement reconnue dans le domaine » [traduction libre] (« *At present, there are no widely accepted standard methods or protocols to conduct these evaluations of entire cool storage systems in the field (in-situ).* », Reddy et al., 2001, p. 12). Il apparaît clair que l'absence de méthode d'évaluation de la performance in situ adaptée aux systèmes de stockage thermique évoquée dans cet ouvrage de 2001 contribue toujours à la déficience des méthodes de conception de ces systèmes évoquée plus récemment par Dinçer et Rosen (2021) et à la difficulté d'élaborer des séquences d'opération robustes mentionnée par Glazer (2019), et vice-versa. **Il est en effet difficile de dimensionner adéquatement un système et de prévoir l'opération efficiente de celui-ci s'il faut au préalable définir une méthode personnalisée pour quantifier la performance qui en résulte.** Reddy et al. (2001) ont proposé une méthode qui emploie des données d'opération et des données mesurées pour élaborer des modèles simplifiés de consommation énergétique

afin de quantifier les économies. Ils ont élaboré cette méthode à partir de trois études de cas portant sur des réservoirs d'eau glacée et de glace. Ils visaient, par le développement de cette méthode, outiller l'élaboration de méthodes adaptées à d'autres types de systèmes CVCA, ce qui est particulièrement important pour l'atteinte du second objectif spécifique de ce mémoire. Malgré que cette méthode ne portait pas précisément sur l'ATC hydronique et qu'elle ne visait pas à identifier des pistes d'amélioration de la performance, il est tout de même intéressant d'en tirer des constats applicables à ce projet de recherche, dont ceux-ci :

1. Il est possible d'estimer les économies réalisables à long terme à partir de mesurage effectué durant une courte période (<1 an). Il faut sélectionner judicieusement cette période de mesurage, car elle doit comprendre les pointes saisonnières de besoins thermiques, c'est-à-dire les moments où les besoins sont les plus élevés. D'après les résultats de l'étude, une période de mesurage de 2 à 3 mois donne, pour deux des trois études de cas, des estimations acceptables des économies annuelles, à 5% près, lorsque comparées aux économies calculées à partir de mesurage pendant une année complète.
2. La validation des données est une étape importante. Idéalement, il faudrait suivre les recommandations de la norme *ANSI/ASHRAE 150* et vérifier in situ l'exactitude de mesure des instruments avant la collecte de données. Si cela ne peut être fait, il faut valider a posteriori les données par des bilans d'énergie et de masse. Si des écarts significatifs sont remarqués par rapport aux principes de conservation de l'énergie et de la masse, des corrections doivent être apportées aux données mesurées. Il est par conséquent une bonne pratique de prévoir l'acquisition de plus de points de données que le strict nécessaire (p. ex. un 2^e point de mesure de température disponible plutôt que le seul minimalement requis). Autrement, il faudra éliminer les plages de données avec des écarts qui n'ont pu être expliqués.

En regard du premier point, il s'avère nécessaire d'acquérir les données d'opération et mesurées pour quantifier la performance d'ATC durant les périodes de l'hiver où le réseau hydronique comble les besoins thermiques les plus élevés. Quant au second point, quantifier les flux d'énergie entrant et sortants de l'ATC mentionné à l'étape 1 au début de la présente section sert donc non seulement à quantifier les indicateurs de performance, mais avant tout à

vérifier la cohérence des données. Le flux d'énergie entrant, la puissance électrique consommée par les éléments chauffants lors de la charge, peut être mesuré directement avec un wattmètre ou estimé à partir de données extraites des canaux CLoc et RLoc. Les flux d'énergie sortants correspondent à la puissance thermique fournie lors de la décharge et aux pertes thermiques. Pour quantifier la puissance thermique fournie par l'ATC, il faut évaluer le débit volumique d'eau (\dot{V}) circulant dans l'échangeur de chaleur, comme indiqué précédemment par l'équation (1.2). La prochaine sous-section présente une méthode de mesure de débit d'eau in situ. Les autres paramètres de cette équation peuvent être estimés à partir des tables de propriétés physiques de l'eau (ρ et C_p) et être calculés à partir des données d'opération extraites du BMS (ΔT_{eau}). La sous-section 1.3.4 aborde les méthodes utilisées dans la littérature pour quantifier les pertes thermiques.

1.3.1 Mesures non invasives de débit d'eau

Le débit d'eau est un paramètre requis pour quantifier la puissance thermique fournie par l'ATC lors de la décharge. Dans l'idéal, il devrait être mesuré en continu durant toute la période de mesurage, tel que recommandé par l'IPMVP et fait par Reddy et al. (2001), mais cela n'est pas toujours possible, entre autres pour des raisons techniques, logistiques ou budgétaires. La littérature propose des alternatives aux mesures en continu de débit. Song, Joo, et Wang (2012) ont comparé l'incertitude de deux méthodes d'estimation du débit d'eau à l'incertitude de mesures en continu prises avec un débitmètre. Ces deux méthodes d'estimation sont :

1. L'établissement d'une courbe calibrée de la pompe qui exprime le débit mesuré par un débitmètre en fonction des conditions d'opération de la pompe (pression, vitesse de rotation, etc.). Le débit est estimé subséquentement à partir de données d'opération de la pompe et de cette courbe.
2. L'estimation du débit à partir des courbes (débit/pression) tirées des fiches techniques des pompes et des courbes du réseau de tuyauterie établies par calculs.

Ils ont conclu que la première méthode mène à une erreur d'estimation de $\pm 1\%$ par rapport aux mesures prises avec un débitmètre. Cette erreur d'estimation est jugée acceptable puisqu'elle est comparable à l'exactitude de mesure du débitmètre qui est de $\pm 0,5\%$ de la valeur lue. Au

contraire, la seconde méthode n'est pas recommandée puisque la relation débit/pression in situ peut différer largement des estimations faites lors de la conception. Il faut noter que leur étude a été réalisée sur une pompe à débit variable contrôlée par un variateur de fréquence. Le point de fonctionnement débit/pression de ce type de pompe est plus difficile à établir que celui d'une pompe à débit constant, étant donné que la courbe de pression de la pompe et la courbe de pression du réseau de tuyauterie varient toutes deux en fonction du débit. Il faut donc des données d'opération de la pompe à débit variable durant toute la période de mesurage. Le point de fonctionnement d'une pompe à débit constant, comme celle de l'ATC, devrait au contraire rester sensiblement le même, à moins de variations importantes de pression induites par d'autres composants du réseau hydronique, tels que des valves. Les résultats issus de la seconde méthode démontrent qu'il faut au minimum mesurer le débit pendant une courte période pour établir le fonctionnement in situ de la pompe et non pas se baser uniquement sur des estimations faites lors de la conception.

Différents principes physiques peuvent être exploités pour mesurer un débit de liquide dans un tuyau. Le *Guideline 14* d'ASHRAE (2014, p. 68) présente entre autres le débitmètre à ultrasons à temps de transit (*transit-time ultrasonic flowmeter*, en anglais). Ce type de débitmètre est adapté à des mesures non invasives puisqu'il s'installe à l'extérieur du tuyau : il n'intervient donc pas directement avec l'écoulement. Il ne requiert pas non plus d'interrompre le débit pour l'installer : il n'a donc pas d'impact sur l'opération du réseau de chauffage. Song et al. (2012) ainsi qu'Antonucci, Noris, Oberegger et Gasparella (2015) l'ont utilisé pour établir des courbes calibrées de pompes à partir de mesures in situ. Ce type de débitmètre mesure le temps de propagation d'une onde ultrasonique entre deux sondes, le temps de transit, qui est lié à la vitesse axiale du liquide dans le tuyau. La vitesse de propagation du son dans le liquide à l'arrêt, le matériau du tuyau, son diamètre externe et son épaisseur influencent aussi le temps de transit. En supposant que l'écoulement est pleinement développé et que le liquide occupe tout l'espace disponible, c'est-à-dire que la pression hydraulique est suffisamment élevée pour qu'il n'y ait pas d'air dans le tuyau, le débit volumique (\dot{V}) est calculé en multipliant la vitesse axiale du liquide par la section du tuyau et par des facteurs de correction liés à la propagation de l'onde et au profil de vitesse du liquide. La norme *ASME MFC-5.1-2011* (American Society of

Mechanical Engineers, 2011) spécifie d'installer les sondes le plus loin possible de tout élément pouvant perturber l'écoulement (p. ex. réducteur, coude, jonction, vanne, pompe, etc.) pour s'assurer qu'il soit pleinement développé. La distance à respecter entre cet élément perturbateur et les sondes dépend du diamètre nominal (D_N) du tuyau et du type d'élément perturbateur. En règle générale, il est recommandé d'avoir une longueur droite de tuyau, sans éléments perturbateurs, d'au moins 10 à 15 fois le diamètre nominal en amont de la première sonde (S_1) et d'au moins 3 à 5 fois le diamètre nominal en aval de la seconde (S_2), tel que montré sur la Figure 1.8 où les éléments perturbateurs sont des coudes (Badger Meter, Inc., 2015; Endress + Hauser, s.d.).⁹

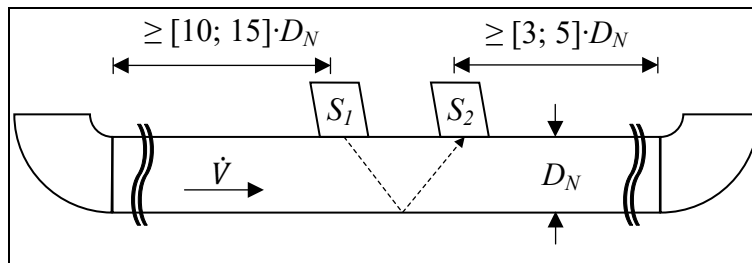


Figure 1.8 Distances à respecter en amont et en aval de l'écoulement pour le positionnement des sondes de débitmètre à ultrasons à temps de transit

Le *Guideline 14* d'ASHRAE (2014, p. 69) mentionne que les mesures de débit par ultrasons sont particulièrement sensibles aux conditions d'installation et d'écoulement et met en garde le fait d'utiliser l'exactitude de l'appareil spécifiée par le manufacturier, typiquement entre 1 et 3% de la valeur lue, pour des mesures in situ. Sans donner de valeur spécifique à considérer ou des facteurs de correction à inclure, ce document propose une méthode de mesure qui considère une exactitude de $\pm 5\%$ de la valeur lue. À titre comparatif, Antonucci et al. (2015) ont considéré une incertitude globale de $\pm 2\%$ sur les mesures prises avec un débitmètre à ultrasons. La norme *ASME MFC-5.1-2011* évoque l'incertitude sur le diamètre et sur l'épaisseur du tuyau comme autres sources d'erreurs. Elle recommande de mesurer directement

⁹ Lorsque l'élément perturbateur est une pompe, une vanne ou des redirections successives d'écoulement, les longueurs droites requises sont plus élevées.

ces paramètres, sans toutefois proscrire l'utilisation de valeurs nominales tabulées. Les valeurs mesurées de diamètre et d'épaisseur, même pour un tuyau à l'état neuf, diffèrent des valeurs nominales selon une tolérance normée. De plus, l'épaisseur est altérée par l'encrassement, la corrosion et l'érosion à l'intérieur du tuyau. La mesure de l'épaisseur d'un tuyau peut être faite avec une jauge à ultrasons, mais elle ne permet pas de mesurer l'encrassement. Les conditions d'installation du débitmètre, d'écoulement du liquide, de géométrie et d'encrassement du tuyau sont donc les limites principales des mesures de débit par ultrasons. Elles ont en revanche la commodité d'être non invasives, ce qui facilite le mesurage in situ sur une installation dont on ne peut pas altérer le fonctionnement.

1.3.2 Puissance maximale appelée, déplacement et nivelage de la demande

En quantifiant la puissance thermique fournie par l'ATC à partir des mesures de débit d'eau (flux d'énergie sortant) et la puissance électrique consommée par les éléments chauffants (flux d'énergie entrant), l'impact sur la demande d'électricité du bâtiment peut ensuite être quantifié. Cet impact a été illustré au Tableau 1.1 notamment pour le déplacement et le nivelage de la demande. Pour ce faire, il faut comparer le profil de puissance électrique appelée du bâtiment incluant l'ATC à celui du scénario de substitution, c'est-à-dire la puissance électrique qui aurait été appelée par le bâtiment si une autre mesure (p. ex. un autre équipement) avait été installée au lieu de l'ATC. Dans les deux scénarios, avec et sans ATC, le profil de besoins thermiques comblé est le même. Une façon simple de quantifier l'impact sur la demande d'électricité, en puissance absolue (kW), est de soustraire les puissances maximales appelées **mensuelles** des deux scénarios et de déterminer s'il y a augmentation, diminution ou pas d'impact amené par l'ATC. Cela permet par la suite de quantifier l'impact, en dollars (\$), sur les coûts mensuels d'appel de puissance qui sont facturés au bâtiment. C'est ce que Moreau et Dion (2010), Moreau et Steffes (2009), ainsi que Belzile et al. (2012) ont fait dans leurs travaux sur des ATC hydroniques installés dans des bâtiments institutionnels.

La particularité de l'impact (en kW) d'une mesure de gestion de la demande sur la puissance maximale appelée est son **instantanéité**, typiquement **moyennée sur 15 minutes**, par rapport

à l'impact d'une mesure d'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie (en kWh) qui est une **sommation** sur une période plus longue (p. ex. mensuelle, saisonnière, annuelle). Cette instantanéité est étroitement liée à l'opération des équipements dans le bâtiment et à une certaine imprévisibilité de la demande totale, par exemple au démarrage des systèmes CVCA et des autres équipements électriques avant l'arrivée des occupants (Motegi, Piette, Watson, Kiliccote, & Xu, 2007). Certains indicateurs peuvent réduire l'effet de cette instantanéité en considérant une plus longue période pour quantifier l'impact sur la demande. Parmi ceux-ci, il est courant de quantifier le facteur d'utilisation (FU) autant pour des cas de déplacement que de nivelage. Le FU est le ratio entre la consommation mensuelle d'électricité (en kWh) et la consommation qui aurait eu lieu si la puissance maximale appelée pendant ce même mois avait été constante. Le FU indique donc s'il y a un écart important entre la consommation d'électricité et la puissance maximale appelée pendant un mois donné. Plus récemment, l'indice dynamique de flexibilité énergétique moyenne d'un bâtiment (*average dynamic building energy flexibility index* (BEFI), en anglais) a été proposé par Morovat, Athienitis, Candanedo et Delcroix (2022) pour des cas de déplacement. Le BEFI exprime en unités de puissance (p. ex. W, W/m²) la capacité d'un bâtiment, à un instant donné, à déplacer la demande d'électricité par rapport au scénario de substitution. Ainsi, autant le FU que le BEFI expriment des impacts sur la demande qui ne surviennent pas **strictement** à l'instant où l'appel **mensuel** de puissance électrique maximale survient. Ces indicateurs conservent tout de même une certaine instantanéité, puisqu'ils dépendent du profil temporel de demande d'électricité.

Pour analyser plus en détail ces profils dans le but d'améliorer les séquences d'opération des équipements et de gestion de la demande, la littérature fait état de différentes méthodes, dont l'analyse graphique (Price, 2010), la régression linéaire (ASHRAE, 2014) et le regroupement (*clustering*, en anglais) (Luo, Hong, Chen, & Piette, 2017). Ces méthodes sont utilisées pour établir des modèles de prédiction de la demande et pour évaluer l'impact de mesures sur la puissance maximale appelée. Par ailleurs, il est courant qu'une valeur approchant la puissance électrique maximale appelée, donc à un percentile inférieur à 100, soit considérée. La valeur de ce percentile varie selon les références consultées, allant du 90^e (ASHRAE, 2014), au 95^e (Luo et al., 2017) ou encore au 97,5^e percentile (Price, 2010). Ces

percentiles ont surtout été utilisés pour des cas de déplacement, c.-à-d. lorsqu'il y a un impact sur la puissance maximale appelée, plutôt que pour des cas de nivelage. Tout comme les modèles de prédiction, ces percentiles visent à évaluer la robustesse des séquences d'opération et de gestion de la demande. Autrement dit, ils visent à évaluer la persistance de l'impact sur la demande, plutôt que le strict impact en kW sur la puissance maximale appelée mensuellement, qui lui sert surtout à quantifier la réduction des coûts. Il n'y a pas de méthode applicable à tous les cas, ce qui explique cette variété de méthodes et de valeurs de percentiles.

Enfin, il est encore courant dans la littérature portant sur les ATC de s'en tenir à une analyse **simplifiée** de l'impact sur la demande d'électricité, notamment en quantifiant la puissance maximale appelée mensuellement, les coûts d'appels de puissance et le FU. Pour des cas de déplacement de la demande, le BEFI est à considérer. Dans ce mémoire, une telle analyse simplifiée sera utilisée. Elle est jugée suffisante pour quantifier la performance d'ATC hydroniques et identifier des pistes d'amélioration de celle-ci (objectifs spécifiques 2 et 3).

1.3.3 Rendement énergétique

À partir de la puissance thermique fournie et de la puissance électrique consommée par l'ATC, le rendement énergétique, un indicateur couramment utilisé pour quantifier la performance d'équipements conventionnels de chauffage (p. ex. chaudière), peut être quantifié. Il exprime la capacité, dans des conditions d'opération données, à convertir en chaleur de l'énergie sous forme d'électricité, de combustible ou de biomasse. Le rendement énergétique est soit instantané (η_i), calculé comme le ratio entre la puissance fournie et la puissance consommée à un instant donné, ou bien saisonnier (η_{saison}), calculé comme le ratio entre l'énergie fournie et l'énergie consommée pendant une période donnée. Le calcul d'une valeur saisonnière est mieux adapté aux systèmes de stockage thermique étant donné que la charge et la décharge n'ont pas nécessairement lieu au même instant. Pour un ATC, le rendement énergétique saisonnier correspond au ratio entre l'énergie thermique fournie lors de la décharge ($Q_{Déch}$) et

l'énergie électrique consommée lors de la charge (E_{Ch}), tel qu'indiqué par l'équation (1.3), en négligeant l'énergie consommée par le moteur du ventilateur lors de la décharge.¹⁰

$$\eta_{saison} = \frac{Q_{Déch}}{E_{Ch}} \quad (1.3)$$

Adaptée d'ASHRAE (2010, p. 9)

Quantifier le rendement énergétique saisonnier permet d'une part de comparer la performance d'ATC entre eux, lorsque les conditions d'opération sont similaires. D'autre part, le rendement énergétique (η_i et η_{saison}) peut servir à substituer, de façon simplifiée, l'ATC par un autre équipement et à quantifier la puissance et l'énergie que ce dernier aurait consommées pour desservir le même besoin thermique. L'étape 2 nécessaire pour quantifier l'impact énergétique énoncée au début de la section 1.3, soit de substituer l'ATC par une autre mesure et comparer les indicateurs de performance, pourrait être complétée avec une telle approche. Comme le rendement énergétique, tant instantané que saisonnier, est utilisé pour d'autres équipements de chauffage, il est possible d'émettre une hypothèse sur sa valeur et de l'admettre **constante** à partir de la littérature, par exemple des études de mesurage in situ, des spécifications techniques établies en suivant des normes et des certifications exigeant des seuils minimums de performance à atteindre (p. ex. celles de l'AHRI).

Le point essentiel à valider en utilisant une approche de substitution par le rendement énergétique est de s'assurer que cet autre équipement aurait pu combler le même besoin thermique, dans les mêmes conditions d'opération. Par « même » besoin thermique, il est question d'une même puissance de chauffage et d'une température d'eau chaude fournie suffisante pour qu'il y ait transfert de chaleur au réseau de chauffage.

¹⁰ La puissance mécanique du moteur est de ¼ HP (187 W) (Steffes, s.d.d). En supposant un rendement de 60% pour ce moteur PSC (National Institutes of Health, 2016), sa puissance électrique nominale est de 312 W, donc inférieure à 1% de celle des éléments chauffants de 53 ou 80 kW. Ce rapport de puissances se répercute sur les consommations d'énergie respectives de ces composants. Ainsi, l'énergie consommée par le moteur a un impact négligeable sur le rendement énergétique saisonnier de l'ATC hydronique par rapport aux éléments chauffants.

Pour les équipements conventionnels de chauffage à eau chaude, tels une chaudière électrique ou au combustible, leur gamme de puissances et de températures d'opération et le fait que plusieurs ATC hydroniques en aient remplacés confirment qu'ils auraient pu combler le même besoin thermique. Une étude de mesurage in situ sur une chaudière à condensation au gaz naturel a par exemple montré un rendement énergétique de 85 à 90% pour des températures d'eau chaude fournie de 70 à 80°C (Bălănescu, Homutescu, Ianuş, & Lupu, 2020).

Les systèmes centralisés de stockage thermique adaptés au chauffage hydronique à des températures de l'ordre de 70 à 90°C sont en revanche nettement moins nombreux sur le marché. Comme mentionné précédemment, les réservoirs d'eau chaude sous-pression pourraient y être adaptés, mais leur densité de stockage (en kWh/m³) jusqu'à 12 fois plus faible que l'ATC complique leur installation dans les bâtiments existants qui ont des contraintes d'espace. Ce système pourrait combler le même besoin thermique que l'ATC hydronique, mais il serait difficile de l'appliquer systématiquement à plusieurs bâtiments. Pour ce qui est d'un système géothermique, la plage d'opération de la plupart des thermopompes eau-eau disponibles pour le marché résidentiel et commercial n'est pas adaptée à cette gamme de températures. Les thermopompes ne peuvent généralement pas chauffer l'eau à plus de 70°C avec une source géothermique de basse température, à moins d'utiliser du CO₂ comme réfrigérant ou celles conçues pour des applications industrielles (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022, pp. 6-9). De toute façon, une approche de substitution par le rendement énergétique n'est pas adaptée à des systèmes avec thermopompes, car l'indicateur approprié est le coefficient de performance et non le rendement énergétique.¹¹ La valeur de ce coefficient de performance, autant instantanée que saisonnière, varie en fonction des conditions d'opération et de la température de la source de chaleur (p. ex. sol, air extérieur, eau). On ne peut donc pas substituer l'ATC hydronique par un système avec thermopompes sur la simple base d'une hypothèse de coefficient de performance constant, d'autant plus que la plupart des thermopompes ne desservent pas une gamme de températures similaire. En fait, une approche

¹¹ La distinction entre le coefficient de performance et le rendement énergétique vient du fait qu'une thermopompe transfère de l'énergie thermique d'un environnement à un autre plutôt que de convertir de l'énergie en chaleur.

de substitution par rendement énergétique constant restreint les autres équipements qui peuvent être considérés. Il apparaît que les équipements conventionnels de chauffage à eau chaude, tels une chaudière électrique ou au combustible, sont adaptés à cette approche et auraient pu combler le même besoin thermique que l'ATC hydronique.

En terminant, la valeur de rendement énergétique saisonnier d'un ATC ne peut être comparée directement avec celle d'un équipement conventionnel de chauffage (p. ex. chaudière), puisque ce dernier ne stocke pas d'énergie. Le rendement énergétique saisonnier d'un système de stockage thermique peut être inférieur à celui d'un équipement conventionnel, en partie à cause des pertes thermiques qui se produisent lors des périodes d'attente. Il est donc attendu que le rendement énergétique saisonnier d'un ATC sera inférieur au seuil maximal de 100% et que l'écart à ce seuil sera surtout dû à son usage (c.-à-d. les températures de stockage maintenues), en plus de son isolation thermique. Le rendement énergétique saisonnier peut être amélioré en stockant au moment opportun le niveau adéquat d'énergie dans les briques de l'ATC pour combler les besoins thermiques, ce qui réduit les pertes. C'est donc un indicateur lié au troisième sous-objectif.

1.3.4 Pertes thermiques

Les pertes thermiques constituent le second flux d'énergie sortant de l'ATC qui doit être quantifié pour mesurer la performance in situ. Reddy et al. (2001) ont mis de l'avant l'importance de valider les données en s'appuyant sur des bilans d'énergie, ce qui requiert de quantifier les pertes thermiques. Pourtant, dans leur rapport de projet de recherche, ils ont émis l'hypothèse que les pertes thermiques des systèmes étudiés représentaient entre 1 et 5% de la capacité nominale de stockage sans toutefois les mesurer. Dans un article de conférence subséquent, ils précisent qu'il faut s'assurer qu'elles demeurent dans un ordre de grandeur plausible, notamment en s'appuyant sur la littérature (Elleson, Haberl, & Reddy, 2002). La littérature portant sur les systèmes de stockage de glace et d'eau glacée permet d'émettre cette hypothèse (Glazer, 2019, p. 282). Ce n'est pas le cas de l'ATC hydronique pour lequel la documentation technique ne fournit qu'une valeur de pertes maximales (voir Tableau 1.2). Il

faut aussi pouvoir quantifier ce flux énergétique afin d'évaluer la capacité actuelle utilisable d'énergie stockée lors de la conception, tel que mis de l'avant dans la sous-section 1.1.3.

Il est important de souligner que les pertes thermiques des ATC sont considérées de diverses manières dans la littérature. Moffet et al. (2012), qui ont réalisé une étude sur un ATC à air forcé adapté aux besoins d'un **bâtiment résidentiel**, ont calculé les pertes thermiques pour évaluer la quantité d'énergie demeurant stockée dans les briques à la fin de chaque heure de leur simulation. Ils ont considéré que ces pertes contribuaient à combler la charge de chauffage de la résidence, donc qu'elles n'étaient pas des « pertes » au sens strict. En effet, dans un bâtiment résidentiel typique, l'ATC est installé au sous-sol, dans une pièce où il est raisonnable de présumer que la chaleur qu'il dégage se distribuera naturellement dans les autres pièces à proximité. Or, dans un **bâtiment C&I**, l'ATC est plutôt installé dans une salle mécanique, en retrait des espaces où sont les occupants. Bien que non conditionnée, la température ambiante dans cette salle est souvent plus élevée que celle des espaces occupés, puisqu'elle abrite plusieurs équipements dégageant de la chaleur (p. ex. pompe, chaudière, refroidisseur, compresseur, ventilateur, chauffe-eau, etc.). C'est donc une zone exothermique d'un bâtiment C&I, même en l'absence d'ATC, contrairement au sous-sol d'une résidence. En plus, lorsque des équipements utilisant des combustibles sont présents, il est requis d'installer un système d'évacuation d'air. Une partie de la chaleur dégagee par l'ATC est alors évacuée du bâtiment C&I et ne contribue pas à combler la charge de chauffage des autres espaces, ce qui constitue des pertes au sens strict. Date et al. (2020) et Glazer (2019) mentionnent en outre que, dans les bâtiments C&I étudiés, les pertes thermiques sont significatives lorsque la quantité d'énergie stockée est maintenue élevée durant plusieurs jours consécutifs. Le guide de Glazer (2019) considère aussi l'énergie résiduelle d'un système pleinement déchargé comme des pertes. Dans ce mémoire, seule l'énergie thermique libérée dans l'air ambiant par un ATC installé dans un bâtiment C&I est considérée comme des pertes thermiques.

Pour quantifier les pertes thermiques, la littérature fait état de diverses approches adaptées aux ATC, tant à air forcé qu'hydroniques, dont les quatre qui suivent :

- Équation empirique établie à partir de mesures expérimentales :
Moffet et al. (2012) ont utilisé une relation liant les pertes thermiques à la température moyenne des briques d'un ATC à air forcé adapté aux bâtiments résidentiels, donc différent de l'ATC hydronique. Cette relation quadratique a été établie à partir de mesures expérimentales lorsqu'il était en charge ou en attente. Il n'y a toutefois pas d'information sur la méthode utilisée pour l'établir (p. ex. nombre de points de mesure de la température des briques, durée des mesures expérimentales, répartition des périodes de charge et d'attente) qui permettrait d'adapter cette méthode à l'ATC hydronique et au présent projet de recherche.
- Équation analytique validée par des mesures expérimentales :
Date et al. (2020) ont développé un modèle analytique d'un ATC à air forcé adapté aux bâtiments C&I en appliquant les équations de transfert de chaleur. Pour calculer les pertes, les auteurs ont estimé les coefficients de convection et de rayonnement aux surfaces, estimé les résistances thermiques des couches isolantes et calculé la température des surfaces par bilan d'énergie. Le modèle a été calibré avec des mesures de la température des briques prises à quatre endroits pendant 11 jours, incluant une période d'attente prolongée d'environ 36 heures consécutives. Une conclusion des auteurs est que la température des briques peut être réduite à une seule température moyenne, un seul nœud, sans induire une erreur de calcul élevée par rapport aux autres modèles comprenant jusqu'à 140 nœuds. Ainsi, il serait approprié de calculer la température moyenne des briques à partir des mesures in situ prises par les trois sondes de l'ATC hydronique pour évaluer les pertes thermiques.
- Équation analytique validée par un bilan d'énergie saisonnier :
Danjou (2021) a quantifié les pertes thermiques d'ATC hydroniques de 80 kW à partir de données d'opération avec une méthode semblable à celle de Date et al. (2020), soit en estimant les coefficients de convection, de rayonnement et les résistances thermiques et en calculant les températures de surface. Il a utilisé la température moyenne des briques calculée à partir des trois sondes de l'ATC hydronique et émis

une hypothèse sur la température ambiante, assumée constante. Il a négligé le fait que les couches comprises entre les briques et chacune des surfaces externes de l'ATC hydronique diffèrent, ce qui fait varier la résistance thermique de part et d'autre des briques. Par exemple, les couches entre les briques et la surface latérale gauche (voir la Figure 1.2 b) comprennent le canal de circulation d'air, ce qui n'est pas le cas du côté droit. Les couches entre les briques et la surface du dessus comprennent quant à elles un isolant rigide différent de celui sur les surfaces latérales. Danjou a validé son modèle avec une méthode qui s'apparente à celle de Date et al., mais au lieu d'utiliser les températures des briques mesurées à chaque instant, il a plutôt fait un seul bilan entre l'énergie fournie, l'énergie consommée, l'énergie stockée et les pertes au bout d'une période de quatre mois. Cette validation est donc partielle par rapport aux bilans d'énergie instantanés (c.-à-d. le bilan des flux d'énergie entrants et sortants à chaque instant), qui est une conclusion tirée précédemment du projet de Reddy et al. (2001).

- Test in situ avec une quantité d'énergie stockée maximale et constante :
La norme *ANSI/ASHRAE-94.2-2010* (ASHRAE, 2010) propose de quantifier les pertes thermiques d'un ATC en mesurant l'énergie électrique consommée pour maintenir la quantité maximale d'énergie stockée dans les briques pendant au moins 8 h consécutives. Ce test revient à quantifier les pertes maximales pendant la charge avec une consigne de température des briques constante et maximale pour établir une spécification telle que celle dans le Tableau 1.2. Cependant, il ne permet pas d'évaluer les pertes thermiques en conditions réelles d'opération puisque la consigne de température des briques n'est pas constante et maximale en tout temps. De plus, ce test requiert d'y consacrer l'ATC pendant au moins 8 h, ce qui n'est pas adapté au mesurage de performance in situ d'un ATC qui doit continuer de desservir les besoins thermiques.

En résumé, les méthodes utilisées par Date et al. (2020) et Danjou (2021) sont adaptées au mesurage de performance in situ. Elles requièrent cependant d'estimer plusieurs paramètres et mènent à des modèles détaillés exigeant la résolution de plusieurs équations. L'objectif de faciliter la mise en œuvre sous-entend à l'inverse de développer une méthode simplifiée pour quantifier les pertes thermiques. En ce sens, Glazer (2019) propose d'estimer les pertes

thermiques d'un réservoir de glace ou d'eau glacée avec une équation simplifiée. L'équation (1.4), adaptée de Glazer (2019), indique la relation entre les pertes thermiques (\dot{Q}_{pertes}) d'un ATC hydronique, le coefficient de déperditions thermiques (U), la surface exposée à l'air ambiant (A), la température moyenne des briques $\bar{T}_{briques}$ et la température ambiante (T_{amb}).

$$\dot{Q}_{pertes} = U \cdot A \cdot (\bar{T}_{briques} - T_{amb}) \quad (1.4)$$

Adaptée de Glazer (2019, p. 23)

La méthode *Lumped Capacitance* peut être utilisée pour estimer la variation de température d'un matériau dont la température est admise homogène et qui est soumis à des conditions ambiantes constantes. Inversement, cette méthode peut être utilisée pour estimer le coefficient de déperditions thermiques U de l'équation (1.4) en faisant des régressions entre les températures mesurées des briques et le temps. L'étude de Date et al. (2020) a montré que de supposer homogène la température des briques a eu un faible impact sur les résultats de leur modèle par rapport aux mesures expérimentales, indiquant que l'hypothèse d'homogénéité de température était raisonnable. Un coefficient moyen de déperditions thermiques, représentatif d'ATC hydroniques en opération, procurerait ainsi une méthode d'estimation des pertes thermiques, facilitant la conception et l'analyse de performance in situ.

1.3.5 Indicateurs statistiques

Le recours à des indicateurs statistiques pour juger de la qualité d'un modèle de régression est nécessaire. Les équations (1.5) et (1.6) définissent respectivement les indicateurs suivants : l'erreur de justesse moyenne normalisée (*Normalized Mean Bias Error*, en anglais) NMBE et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error*, en anglais) CV(RMSE). Ces équations s'appliquent à un modèle de régression linéaire développé à partir de N données expérimentales (c.-à-d. les données mesurées). La variable y_i représente les données expérimentales, la variable \hat{y}_i représente les estimations par le modèle et la variable \bar{y} est la moyenne des données expérimentales y_i .

$$NMBE = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{(N - 1) \cdot \bar{y}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

Adaptée d'ASHRAE (2017, p. 19.35)

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N - 1} \sum(y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

Adaptée d'ASHRAE (2017, p. 19.35)

La principale différence entre ces deux indicateurs est que les écarts $(y_i - \hat{y}_i)$ positifs et négatifs peuvent s'annuler entre eux dans le calcul du NMBE, alors qu'ils s'additionnent entre eux, en les élevant au carré, dans le calcul du CV(RMSE). Le NMBE indique donc si le modèle de régression a tendance, en moyenne, à surestimer ou à sous-estimer la variable y . Le CV(RMSE) indique quant à lui la précision du modèle. Pour des données expérimentales horaires, ASHRAE (2017) stipule qu'un modèle de régression est acceptable et jugé calibré lorsque les critères suivants sont satisfaits :

- le NMBE est inférieur à 10%;
- le CV(RMSE) est inférieur à 30%.

En plus du NMBE et du CV(RMSE), le coefficient de détermination (R^2) est couramment utilisé pour décrire l'habileté d'un modèle de régression linéaire à expliquer la variance (c.-à-d. une mesure de la dispersion) de la variable de sortie par rapport à la variance de la variable d'entrée. ASHRAE (2017) indique que le R^2 doit être d'au moins 75%. Pour une régression non-linéaire (p. ex. polynomiale d'ordre 2), le coefficient de détermination est ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$) pour tenir compte de l'ajout d'un paramètre dans l'équation.

1.4 Synthèse de la revue de la littérature

La revue de la littérature a exposé certains défis connus, qui sont à relever lors de la mise en œuvre du stockage thermique. Ces défis ont majoritairement été établis pour des systèmes dédiés à la climatisation (p. ex. réservoirs de glace et d'eau glacée), mais portent sur des points

communs à d'autres systèmes, dont l'ATC hydronique. Dans la continuité de ce qui figure déjà dans la littérature, il est nécessaire d'identifier lesquels de ces défis à relever s'appliquent spécifiquement à l'ATC hydronique afin d'améliorer les pratiques actuelles de mise en œuvre dans les bâtiments institutionnels (objectifs spécifiques 1 et 3).

Un de ces défis connus, touchant toutes les phases de la mise en œuvre, est l'établissement et l'implantation de séquences de contrôle robustes. Ces séquences sont cruciales pour assurer l'atteinte des bénéfices visés quant à la gestion de la demande, tant pour les consommateurs que pour les services publics. Pour le consommateur, l'opération du système doit aussi satisfaire les besoins thermiques afin de maintenir les conditions de confort dans le bâtiment. Une maîtrise adéquate du système est donc requise pour s'assurer, au moment de la conception, qu'il convienne aux besoins identifiés. À cet effet, la littérature sur l'ATC hydronique, incluant la documentation technique, présente des lacunes puisque des caractéristiques essentielles ne sont pas documentées, par exemple : la capacité actuelle utilisable d'énergie et les pertes thermiques ne sont pas établies pour plusieurs quantités d'énergie stockée. Elles doivent pourtant être considérées pour stocker une quantité adéquate d'énergie, entre autres pour limiter les pertes et l'exposition des éléments chauffants à des températures élevées. De plus, il apparaît que la littérature sur l'ATC hydronique, incluant des simulations et des études de cas, a principalement visé jusqu'à maintenant à démontrer le potentiel du système (c.-à-d. ce qu'il est possible d'atteindre) sans mettre l'accent sur ce qui doit être fait et mis en place pour atteindre ce potentiel et s'assurer qu'il soit maintenu. Cela aiderait pourtant les professionnels et techniciens de l'industrie à mieux maîtriser la mise en œuvre de l'ATC hydronique. En ce sens, cerner les conditions actuelles d'opération d'ATC hydroniques dans des bâtiments institutionnels, quantifier la performance qui y est associée et proposer des solutions pour l'améliorer contribuent à faciliter sa mise en œuvre (objectifs spécifiques 2 et 3).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE GLOBALE DE RECHERCHE

L'objectif principal de recherche est de faciliter la mise en œuvre des ATC hydroniques dans les bâtiments institutionnels. Les conclusions de la revue de la littérature ont montré que divers défis peuvent être rencontrés lors de la mise en œuvre du stockage thermique, ce qui a inévitablement un impact sur la performance. Ainsi, l'hypothèse initiale de recherche est que cette facilitation peut être faite en cernant les pratiques actuelles de mise en œuvre et en quantifiant la performance qui en découle dans l'optique de les améliorer. C'est en suivant cette logique que ce projet vise à faciliter la mise en œuvre.

Dans un premier temps, il faut documenter les pratiques actuelles en identifiant les défis qui ont été relevés et les leçons qui en ont été tirées. Il est possible que certains défis n'aient pu totalement être relevés et demeurent des barrières à la mise en œuvre efficace. Identifier et contextualiser ces défis, ces leçons et ces barrières permet de proposer des pistes de solutions concrètes.¹² C'est ce qui fait l'objet du Chapitre 3 et qui adresse le premier objectif spécifique de recherche. Pour ce faire, la méthode employée repose sur des entrevues semi-dirigées avec des participants ayant une expérience personnelle liée à l'une ou l'autre des phases de mise en œuvre d'ATC hydroniques. Cette collecte de données sert à compléter les étapes suivantes :

1. Cerner les pratiques actuelles de mise en œuvre et le contexte dans lequel les projets se sont déroulés;
2. Identifier ce qui devrait être amélioré dans les pratiques actuelles;
3. Dégager les bonnes pratiques à adopter dans les projets futurs;
4. Dégager des recommandations pour poursuivre la facilitation.

¹² Pour vérifier si les pistes de solutions proposées permettent réellement de faciliter la mise en œuvre, il faudra éventuellement les tester. C'est toutefois au-delà de la portée de ce projet.

Dans un second temps, il faut quantifier la performance in situ d'ATC hydroniques qui ont été mis en place selon les pratiques actuelles. Les conditions d'opération in situ (p. ex. les principaux éléments de la stratégie de contrôle) doivent être explicitées puisqu'elles ont un impact important sur la performance, tel que mis de l'avant dans la revue de la littérature. C'est ce qui fait l'objet du Chapitre 4 et qui adresse le second objectif spécifique. Cette quantification de la performance est effectuée en réalisant les étapes suivantes à partir de l'analyse de données d'opération et de données mesurées :

1. Évaluer l'impact actuel d'ATC hydroniques sur l'appel de puissance électrique, la consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts d'énergie,
2. Identifier des pistes d'amélioration de la performance afin de maximiser et de pérenniser les bénéfices.

Dans un dernier temps, considérant que les pratiques de mise en œuvre et la performance in situ sont étroitement liées, il est approprié de lier les conclusions des deux chapitres précédents afin de proposer des solutions pour améliorer les pratiques et la performance des installations à venir. Ces solutions sont élaborées conjointement par l'analyse des données extraites des entrevues et par l'analyse des données d'opération et mesurées. C'est ce qui fait l'objet du Chapitre 5 et qui adresse le troisième et dernier objectif spécifique.

La méthodologie globale de recherche est mixte puisque le Chapitre 3 emploie une méthode essentiellement qualitative et le Chapitre 4 emploie une méthode quantitative. Le Chapitre 5 emploie une méthode mixte, reposant à la fois sur des données et analyses qualitatives que quantitatives. Tel que mis de l'avant par Leedy et al. (2019), ce type de méthodologie est retenu pour pallier les faiblesses d'une méthode strictement quantitative, ou strictement qualitative. Une méthode mixte permet en effet une complémentarité, en atténuant les lacunes de chaque méthode et en bonifiant les analyses (Leedy et al., 2019, p. 260). Dans ce projet de recherche, le même niveau d'importance est accordé aux analyses qualitatives et quantitatives. Les collectes de données quantitatives et qualitatives s'étant déroulées à la même période et visant le même objectif principal, le plan de recherche est donc convergent, tel que défini par Leedy et al. (2019) comme un des cinq principaux plans applicables aux méthodes mixtes.

Il est à noter que le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans un projet de recherche plus large dont le mandat a été confié à la directrice de ce mémoire, Pr Katherine D'Avignon, par le Bureau de la transition climatique et énergétique du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Gouvernement du Québec (anciennement Transition énergétique Québec). Dans le cadre de ce mandat, un rapport, intitulé « Stockage thermique et exemplarité de l'État » (D'Avignon, 2022) et dénommé ci-après le « Rapport technique », a été publié préalablement à ce mémoire. Les conclusions du Rapport technique ont été présentées à plusieurs occasions aux acteurs de l'industrie, tant professionnels et techniciens que gestionnaires de parcs immobiliers. L'auteur de ce mémoire est co-auteur du Rapport technique. Les données utilisées dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire ont également été exploitées lors de la rédaction du Rapport technique. Certains résultats et analyses présentés dans les chapitres 3 et 4 de ce mémoire sont donc identiques, et d'autres similaires, à ce qui est contenu dans le Rapport technique.¹³ Lorsqu'une figure ou un tableau présenté dans le Rapport technique est utilisé intégralement ou adapté dans ce mémoire, une référence explicite est indiquée.

La dernière section du Chapitre 4 et le Chapitre 5 exploitent également des données qui ont été traitées, analysées et rendues disponibles par des étudiants faisant partie du même groupe de recherche. Ces étudiants ont publié leurs propres rapports de projet décrivant leurs méthodologies et conclusions. Leurs analyses de ces données ont aussi été intégrées dans le Rapport technique. Lorsqu'une figure, un tableau ou tout autre résultat sont tirés de ces rapports, une référence explicite est indiquée.

¹³ À noter que le site étudié en détail dans le Chapitre 4 correspond au site #10 du Rapport technique.

CHAPITRE 3

DÉFIS À RELEVER ET LEÇONS APPRISSES EN LIEN AVEC LES PRATIQUES ACTUELLES DE MISE EN ŒUVRE D'ATC

Ce chapitre vise à identifier les défis à relever et les leçons apprises lors d'expériences passées de mise en œuvre d'ATC dans des bâtiments institutionnels. Il est entendu que ces défis et ces leçons sont liés aux pratiques actuelles de mise en œuvre. Les pratiques « actuelles » sont les pratiques usuellement retenues par le milieu professionnel et technique qui ont été documentées au cours du présent projet de recherche, par opposition au milieu académique ou scientifique disposant de ressources significativement différentes. Dans ce mémoire, un « défi » signifie une difficulté qui n'est pas surmontée d'emblée, car un minimum de ressources humaines et matérielles, qui ne sont habituellement pas prévues, sont nécessaires. Un défi qui n'a pu totalement être relevé constitue une barrière. Par « leçons apprises », il est question dans ce mémoire des apprentissages réalisés après qu'un défi ait été relevé, totalement ou partiellement. Les leçons apprises facilitent l'expérience subséquente du même individu et des autres en la leur partageant. Ainsi, la collecte de données sur l'expérience passée, la présentation des résultats et l'analyse de ceux-ci sont effectuées dans l'optique d'en soutirer les éléments essentiels permettant de faciliter la mise en œuvre des ATC hydroniques, qui est l'objectif principal de ce mémoire.

Pour ce faire, une synthèse des défis potentiels à relever lors de la mise en œuvre de systèmes de stockage thermique tirés de la revue de la littérature est d'abord présentée. La méthodologie de collecte et d'analyse des données extraites d'entrevues avec des participants ayant une expérience personnelle de mise en œuvre d'ATC est ensuite présentée. Cette analyse permettra de confirmer si les défis potentiels identifiés dans la revue de la littérature se sont présentés dans les expériences passées de mise en œuvre d'ATC et de les préciser à partir d'études de cas. La présentation des résultats suivra, laquelle est sous-divisée comme suit :

- opération : mise en service, suivi de l'opération, suivi de la performance,
- maintenance : maintenance curative, maintenance préventive,

- conception : conception préliminaire, analyse sommaire de rentabilité, conception détaillée, élaboration des séquences de contrôle.

Pour chacune de ces trois sous-sections, les pratiques actuelles, les défis à relever et les leçons apprises seront présentés. L'analyse des liens entre les pratiques, les défis et les leçons apprises permettra d'identifier des bonnes pratiques à adopter pour faciliter la mise en œuvre d'ATC hydroniques, ce qui conclura ce chapitre. Des recommandations seront formulées à la toute fin de ce mémoire en tenant compte des résultats de ce chapitre et des suivants.

Le Rapport technique introduit dans le Chapitre 2 comporte un chapitre dédié à la synthèse de l'expérience vécue, des bonnes pratiques et des recommandations qui s'en dégagent. Les données extraites d'entrevues qui sont utilisées dans ce mémoire et dans le Rapport technique sont les mêmes. Les résultats et les analyses présentées dans le Chapitre 3 de ce mémoire reprennent donc des idées formulées dans le Rapport technique. Ces idées sont toutefois abordées différemment dans ce mémoire, par exemple en les contrastant à la revue de la littérature et en les adaptant au contexte académique et scientifique de la recherche, tandis qu'elles ont été formulées pour le milieu professionnel et technique dans le Rapport technique. Ce faisant, la méthodologie de collecte et d'analyse des données est présentée dans ce mémoire avec plus de précision que ce qui apparaît dans le Rapport technique. La numérotation des participants aux entrevues utilisée dans ce mémoire est la même que celle utilisée dans le Rapport technique, permettant ainsi la complémentarité des deux ouvrages.

3.1 Défis potentiels de mise en œuvre tirés de la revue de la littérature

La revue de la littérature présentée au Chapitre 1 a permis d'identifier des défis potentiels liés à la mise en œuvre de systèmes de stockage thermique dans les bâtiments. Le Tableau 3.1 résume les six principaux défis et indique les sections de la revue de la littérature auxquelles ils se réfèrent. Pour chaque défi potentiel, le Tableau 3.1 indique un exemple de barrière qui est aussi tiré de la revue de la littérature. La dernière colonne du Tableau 3.1 indique quant à elle les phases de la mise en œuvre qui sont concernées par chacun des défis. Les lettres « C », « O » et « M » symbolisent respectivement les phases de conception, d'opération et de maintenance. Le Tableau 3.1 montre que certains défis potentiels (défis 1, 4 et 5) peuvent se présenter au cours de plusieurs phases. Ces défis sont donc à relever par différents intervenants, entre autres les concepteurs, les opérateurs et le personnel chargé de la maintenance. Identifier les défis relevés et les leçons apprises par ces différents intervenants permettra d'en dégager des bonnes pratiques et d'émettre des recommandations facilitant le transfert des connaissances entre ceux-ci et une meilleure coordination.

Tableau 3.1 Défis potentiels de mise en œuvre et barrières tirés de la revue de la littérature

Défis potentiels	Exemples de barrières	Phases concernées
1. Définir clairement l'utilisation visée du système de stockage thermique et à quel besoin il répond puisqu'il peut convenir à une application, mais pas à une autre. (sous-section 1.1.1)	Difficile de cerner l'utilisation à préconiser de l'ATC, car l'importance d'établir la température maximale autorisée des briques et leur consigne selon l'utilisation, ainsi que l'impact d'exposer les éléments chauffants à des températures élevées et prolongées sur leur durée de vie ne sont pas mis en évidence dans la documentation technique. Ce n'est clairement indiqué que dans la documentation disponible sur demande. (paragraphe 1.2.2.3)	C, O, M
2. Établir le profil de besoins thermiques à combler avec des données mesurées ou simulées ayant une résolution suffisante pour inclure des variations journalières et saisonnières. (sous-section 1.1.3)	Ce profil peut difficilement être établi pour un bâtiment existant si seules des factures de consommation mensuelle d'énergie sont disponibles. (sous-section 1.1.3)	C
3. Évaluer la capacité du système de stockage thermique à fournir la puissance et l'énergie thermiques pour combler les besoins. (sous-section 1.1.3)	Absence d'information probante sur la puissance thermique que l'ATC peut fournir dans diverses conditions d'opération. (paragraphe 1.2.2.5)	C
4. Justifier l'installation du système de stockage thermique en quantifiant les bénéfices qui pourront ou qui ont été atteints. (section 1.3)	Flou méthodologique sur comment évaluer la performance de système de stockage thermique et quels indicateurs utiliser. (section 1.3)	C, O
5. Implanter des séquences de contrôle robustes dès la mise en service. (sous-section 1.1.2)	Difficulté d'établir les interactions et l'ordre de priorité des paramètres du contrôleur de l'ATC à partir de la documentation technique. (paragraphe 1.2.2.6)	C, O
6. Prévoir les ressources à allouer pour l'inspection, au besoin le remplacement, des composants les plus sujets à défaillir (p. ex. pompes, moteurs, capteurs) lors de la maintenance préventive. (sous-section 1.1.1)	Absence d'information sur la fréquence des défaillances et sur l'opération de l'ATC associée à celles-ci. Absence d'information sur le coût, le temps et l'expertise requise pour procéder aux remplacements. (paragraphe 1.2.2.3)	M

3.2 Méthode de collecte et d'analyse des données

Les données utilisées dans ce chapitre proviennent d'entrevues semi-dirigées réalisées avec des participants ayant une expérience personnelle liée à une ou plusieurs phases de la mise en œuvre d'ATC hydroniques. La méthode de collecte et d'analyse de données retenue comprend les six étapes suivantes :

1. Définir les thématiques à aborder durant les entrevues,
2. Identifier les candidats potentiels et recruter les participants,
3. Élaborer les questionnaires d'entrevue,
4. Mener les entrevues,
5. Structurer l'information,
6. Analyser les données collectées.

Le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS a approuvé le processus d'entrevues. Les sous-sections qui suivent détaillent chacune de ces étapes.

3.2.1 Étape 1 : Définir les thématiques à aborder

Le Tableau 3.2 présente les thématiques à aborder durant les entrevues ainsi que l'expérience de mise en œuvre concernée par chaque thématique. La nomenclature utilisée dans la colonne de droite, « C », « O » et « M », est la même que celle définie pour le Tableau 3.1. Les thématiques 1 et 2 visent à cerner le contexte ayant permis au participant d'acquérir de l'expérience avec les ATC. Les thématiques 3 à 9 portent chacune sur une des phases de la mise en œuvre, allant de la conception, à l'opération et à la maintenance. Elles visent à documenter les pratiques actuelles et les défis relevés liés à chacune de ces phases. Les thématiques 10 et 11 visent quant à elles à interroger les participants sur leur perception de la rentabilité et de la disponibilité de l'expertise associées à la mise en œuvre d'ATC. La thématique 12 a pour but de donner l'occasion au participant de synthétiser, dans ses propres mots, l'évolution de ses pratiques, ses leçons apprises ainsi que ses recommandations qu'il juge important de retenir.

Tableau 3.2 Thématiques à aborder durant les entrevues

Thématiques d'entrevues	Expérience concernée
1. Expérience et implication personnelles du participant	C, O, M
2. Contexte de conception : mandat, objectifs et contraintes des projets	C
3. Méthodes de conception préliminaire et détaillée	C
4. Établissement de la séquence de contrôle initiale	C
5. Exécution des travaux	C, O
6. Mise en service et optimisation de la séquence de contrôle	C, O
7. Enjeux d'opération rencontrés	O
8. Maintenance curative	M
9. Maintenance préventive	M
10. Rentabilité : durée de vie et économies	C, O, M
11. Expertise professionnelle disponible ou requise	C, O, M
12. Synthèse : évolution des pratiques, leçons apprises et recommandations	C, O, M

3.2.2 Étape 2 : Identifier les candidats potentiels et recruter

Deux catégories de candidats sont susceptibles d'avoir une expérience personnelle leur permettant de se prononcer sur les thématiques identifiées à l'étape 1, soient ceux qui conçoivent des systèmes de chauffage incluant l'installation d'ATC hydroniques et ceux qui veillent à l'opération et à la maintenance de bâtiments qui en comportent. Les candidats veillant à l'opération et la maintenance ont été contactés lors d'une première phase d'entrevues, puis ceux responsables de la conception ont été contactés lors de la seconde phase.

Les candidats potentiels veillant à l'opération et à la maintenance de bâtiments qui comportent des ATC ont été identifiés à la suite de l'envoi aux CSS d'un appel à participer. Cet appel a été communiqué conjointement par la directrice de ce mémoire, Pr Katherine D'Avignon, et par le ministère de l'Éducation dans le cadre du mandat sur le stockage thermique et l'exemplarité de l'État présenté au Chapitre 2. Les réponses reçues à cet appel ont permis d'identifier les responsables du service des ressources matérielles des CSS, puis de les inviter à participer à l'entrevue. Ces personnes sont susceptibles d'avoir acquis une expérience personnelle

d'opération et de maintenance dans leur emploi, même si elles n'effectuent pas nécessairement elles-mêmes les vérifications et les réparations qui y sont liées. Comme leur rôle relève de la coordination des ressources matérielles, ces personnes peuvent donner un aperçu global de l'opération et de la maintenance des ATC hydroniques dans les bâtiments du CSS.

Les candidats potentiels ayant une expérience de conception ont été identifiés à partir de diverses sources d'information dont : des renseignements et des documents transmis par les services des ressources matérielles des CSS (p. ex. des plans et devis), la base de données du SEAO, les contacts identifiés sur les sites Web d'organismes publics (p. ex. directions immobilières de la Société québécoise des infrastructures) et le réseau de contacts de la directrice de ce mémoire. Ces sources d'information ont en outre permis d'identifier des projets spécifiques auxquels les candidats ont contribué, la **plupart** dans des bâtiments de CSS. Puisque ces projets ne couvrent pas **uniquement** des bâtiments de CSS, cela permet d'élargir l'échantillon de projets et d'expériences de mise en œuvre couvertes par les entrevues. De plus, selon la nature de leurs mandats, il est possible que ces candidats aient acquis une expérience liée à l'opération ou la maintenance. Les constats préliminaires issus de la première phase d'entrevues permettront ainsi d'ajuster les questionnaires de cette seconde phase.

Le recrutement des candidats a été effectué par des échanges de courriers électroniques et des appels téléphoniques. Un feuillet d'information, approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS, résumant les objectifs et la portée de l'entrevue leur a été transmis par courrier électronique. L'Annexe I présente le feuillet d'information 1 transmis aux candidats chargés de l'opération et de la maintenance. L'Annexe II présente le feuillet d'information 2 transmis à ceux chargés de la conception.¹⁴ En parallèle de la coordination des entrevues, les questionnaires ont été élaborés.

¹⁴ Le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS a déterminé que la nature des entrevues avec cette catégorie de candidats ne requérait pas d'évaluation éthique, ni de suivi continu de leur part et que les entrevues pouvaient être réalisées. C'est pourquoi ce feuillet ne comporte pas la section « Considérations éthiques » ni la mention d'approbation par le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS.

3.2.3 Étape 3 : Élaborer les questionnaires

Deux questionnaires sont élaborés pour structurer les entrevues avec les deux différentes catégories de candidats. Le questionnaire 1 est utilisé pour les entrevues avec les participants ayant une expérience d'opération et de maintenance uniquement, par exemple les responsables du service des ressources matérielles des CSS. Le questionnaire 2 est utilisé pour les entrevues avec les autres participants, dont certains ont à la fois une expérience relevant de la conception, de l'opération et de la maintenance et d'autres ont une expérience relevant de la conception uniquement. Le questionnaire 2 comprend donc des questions qui se rapportent aux trois types d'expérience. Seules les questions touchant le type d'expérience acquise par le participant lui sont posées.

Le questionnaire 1 comprend les six sections suivantes :

- A. **Informations générales** vise à documenter le nombre de sites avec des ATC, l'expérience du participant avec cette technologie et son implication liée à l'opération et la maintenance (thématique 1);
- B. **Rentabilité** cherche à déterminer les critères économiques qui ont été considérés dans la décision d'installer des ATC et si la rentabilité a été réévaluée depuis leur installation. Cette section vise à cerner les attentes du participant quant à la performance de l'ATC, que ce soit en termes d'économies annuelles, de dépenses liées à la maintenance ou de durée de vie (thématique 10).;
- C. **Exécution des travaux** aborde la qualité et la disponibilité de l'expertise pour l'installation des ATC. Documenter cette étape est important pour comprendre quels intervenants ont été impliqués au moment de l'installation et si cette implication s'est poursuivie durant la phase d'opération et de maintenance (thématiques 5 et 11).;
- D. **Mise en service** cherche à documenter les particularités de mise en service des ATC et comment le transfert de connaissances entre les professionnels, les entrepreneurs et le personnel chargé de l'opération des équipements s'effectue (thématiques 6 et 7);
- E. **Entretien des bâtiments – Exigences particulières** couvre les pratiques de maintenance préventive et les remplacements curatifs de composants qui ont été

nécessaires. Cette section vise aussi à savoir si la maintenance préventive et curative sont exécutées par du personnel externe ou interne (thématiques 8, 9 et 11).;

- F. **Questions générales** porte sur l'évolution des pratiques relatives à l'opération et la maintenance des ATC actuellement installés et les futurs, si d'autres installations sont prévues. Cette section vise aussi à recueillir la perception du participant sur les critères de succès, ainsi qu'à lui permettre de synthétiser ses leçons apprises et ses recommandations (thématique 12).

Afin de préciser les questions et de valider le vocabulaire utilisé, ce questionnaire a fait l'objet de discussions avec la directrice de ce mémoire, ainsi qu'avec un collègue du groupe de recherche ayant réalisé auparavant des entrevues auprès de gestionnaires de projets de CSS.

Le questionnaire 2 comprend onze sections détaillées ci-après. Les sections A, J et K portent sur l'ensemble des projets auxquels le participant a contribué, alors que les sections B à I portent sur des projets spécifiques, identifiés avant l'entrevue en complétant l'étape 2 décrite précédemment. Le contenu des sections A, F, G, J et K est similaire aux sections correspondantes dans le questionnaire 1. Les questions sont néanmoins adaptées puisque les participants visés par chaque questionnaire sont différents. La première phase d'entrevues avec le questionnaire 1 a facilité l'élaboration de ce second questionnaire et permis d'apporter des précisions aux questions. L'objet des sections du questionnaire 2 est expliqué ci-dessous :

- A. **Informations générales** est similaire à la section A du questionnaire 1;
- B. **Mandat et objectifs** vise à clarifier le contexte de conception des installations d'ATC (thématique 2);
- C. **Conception et dimensionnement** porte sur les méthodes de conception préliminaire et détaillée utilisées (thématique 3);
- D. **Contrôle** porte sur l'établissement de la séquence de contrôle des ATC et les choix du concepteur vis-à-vis divers paramètres de contrôle (thématique 4);
- E. **Coûts de conception et d'installation** porte sur les coûts de conception et d'installation d'un ATC et les possibles surcoûts par rapport à d'autres équipements répondant aux mêmes besoins (thématiques 3 et 10);

- F. **Rentabilité** est similaire à la section B du questionnaire 1;
- G. **Mise en service** est similaire à la section D du questionnaire 1;
- H. **Opération et maintenance** vise à connaître l'implication du participant dans des problématiques d'opération et de maintenance rencontrées après la mise en service (thématiques 8 et 9);
- I. **Autres questions spécifiques aux projets identifiés** est une section qui est personnalisée pour chaque entrevue et vise à obtenir des précisions sur des informations obtenues lors du recrutement du participant. Par exemple, des questions sur les plans et devis peuvent être incluses dans cette section.;
- J. **Exécution des travaux** est similaire à la section C du questionnaire 1;
- K. **Leçons apprises et recommandations** est similaire à la section F du questionnaire 1.

Les questionnaires 1 et 2 sont respectivement présentés à l'Annexe III et à l'Annexe IV.

3.2.4 Étape 4 : Mener les entrevues

Les entrevues sont réalisées avec une plateforme de vidéoconférence et durent en moyenne 30 minutes lorsque le questionnaire 1 est utilisé et 60 minutes lorsque le questionnaire 2 est utilisé. Au début de l'entrevue, le participant est à nouveau informé, cette fois verbalement, que sa participation est volontaire. Il peut donc mettre un terme à l'entrevue à tout moment sans justification. Aussi, le participant donne son consentement à ce que la piste audio de l'entrevue soit enregistrée. Au cours de l'entrevue, certaines sous-questions sont ajoutées au questionnaire afin de poursuivre la discussion, de demander des précisions sur des réponses et parfois pour s'assurer que le participant comprenne adéquatement la question posée. L'idée derrière les entrevues est de laisser le participant s'exprimer et partager son expérience autour des thématiques identifiées qui sont précisées par les questionnaires. C'est ce qui donne un format semi-dirigé aux entrevues. Il est à noter qu'un collègue a complété certaines entrevues utilisant le questionnaire 1. L'auteur de ce mémoire a écouté les pistes audio et analysé ces entrevues.

Les entrevues avec les participants visés par le questionnaire 1 ont été complétées entre le 8 octobre 2020 et le 10 septembre 2021. Celles avec les participants visés par le questionnaire 2 ont quant à elles été complétées entre le 1^{er} avril et le 9 août 2021.

3.2.5 Étape 5 : Structurer l'information

Les données collectées lors des entrevues et lors de l'écoute subséquente des pistes audio sont annotées sur le questionnaire de chaque entrevue, sous forme de citations directes et de paraphrases pour les réponses longues et sous forme de notes de travail (p. ex. liste à puces, mots-clés) pour les réponses courtes. Les documents partagés au cours de l'entrevue ou transmis à la suite de celle-ci, par exemple des registres de maintenance, des plans et devis, des captures d'écran de BMS, sont identifiés et enregistrés. À cette étape, le but est d'extraire les informations pertinentes transmises lors de l'entrevue et en lien avec les questions posées, et non la totalité des informations. C'est donc un prétraitement de l'information pour préparer l'étape suivante d'analyse. Le verbatim complet de chaque entrevue n'a donc pas été jugé utile à produire. Les données extraites des entrevues sont colligées dans un fichier informatique sous forme de tableaux. Ce fichier permet de comparer aisément les réponses des participants à chaque question et de préparer l'analyse.

Enfin, les dates d'installation ($Année_{Inst,n}$) des ATC hydroniques relevées durant les entrevues sont utilisées pour calculer, pour chaque participant, le nombre total de saisons de chauffage complétées en date de 2021 ($Nb\ saisons$) avec l'équation (3.1). Pour les quelques cas où l'ATC hydronique a été retiré, l'année de démantèlement ($Année_{Dém,n}$) est considérée dans l'équation. Lorsque possible, les dates d'installation et de démantèlement ont été vérifiées avec les résultats provenant d'un inventaire des technologies de stockage thermique répertoriées dans les bâtiments de CSS (Ido, 2020). Dans cette équation, le symbole N représente le nombre total d'ATC hydroniques duquel le participant a acquis une expérience personnelle.

$$Nb\ saisons = \sum_{n=1}^N \min(Année_{Dém,n} ; 2021) - Année_{Inst,n} \quad (3.1)$$

3.2.6 Étape 6 : Analyser les données

L'analyse des données qualitatives extraites des entrevues est basée sur la méthode de Creswell (2007), décrite par Leedy et al. (2019) et illustrée par la spirale montrée sur la Figure 3.1. Cette représentation schématique montre l'aspect circulaire et progressif de l'analyse des données qualitatives qui est composée de quatre cycles consistant respectivement à : structurer l'information, examiner attentivement les données, classifier et synthétiser. À chaque cycle d'analyse, les données sont étudiées, filtrées, regroupées puis interprétées pour en dégager les constats menant à la synthèse finale, présentée dans ce mémoire. L'auteur de ce mémoire a complété seul les deux premiers cycles d'analyse. Pour les deux derniers cycles, l'auteur et la directrice de mémoire ont collaboré afin d'assurer l'interprétation juste des données qualitatives. Le premier cycle d'analyse a été présenté à l'étape précédente. Il consiste à annoter les questionnaires en faisant une première écoute des pistes audio des entrevues et à regrouper l'information. Les paragraphes qui suivent expliquent comment les cycles suivants ont été appliqués dans ce projet de recherche.

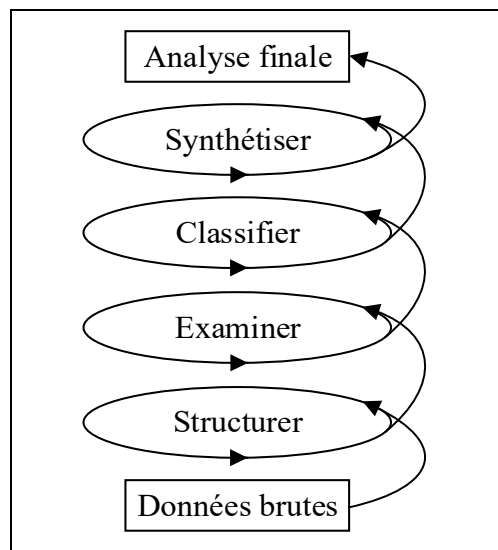


Figure 3.1 Méthode d'analyse de données qualitatives avec la spirale de Creswell
Reproduite et adaptée de Creswell (2007, p. 151), avec autorisation

Le deuxième cycle d'analyse est l'examen attentif des données. Pour ce faire, les pistes audio des entrevues sont écoutées une seconde fois pour interpréter les propos des participants afin d'identifier les défis à relever et les leçons apprises et de les lier à leur expérience vécue et leurs pratiques actuelles. Cette écoute active des propos des participants vise à susciter la réflexion, alors que la première écoute servait essentiellement à annoter les questionnaires.

Une fiche de notes est utilisée pour uniformiser cette seconde écoute. Cette fiche comprend les questions suivantes :

- a) résumer le rôle du participant et son expérience **personnelle** liée à la mise en œuvre d'ATC;
- b) indiquer les éléments qui ressortent **le plus** de l'entrevue (p. ex. des mots ou des phrases répétés, une insistance particulière sur certaines réponses ou un changement de ton dans la voix);
- c) noter **mes** premières impressions à la suite de cette seconde écoute et noter **mon** interprétation des propos du participant par rapport à son expérience vécue;
- d) noter les défis relevés, les barrières non surmontées, les leçons apprises et les problèmes vécus **mentionnés explicitement** par le participant;
- e) noter les défis relevés, les barrières non surmontées et les leçons apprises **que je perçois** (c.-à-d. pas mentionnés explicitement) dans les réponses du participant. Ils peuvent par exemple avoir été sous-entendus par le participant ou regrouper plusieurs exemples qu'il a mentionnés;
- f) **selon moi**, qu'est-ce que les réponses du participant signifient par rapport à son expérience personnelle de mise en œuvre vécue avec les ATC?;
- g) **selon moi**, d'où proviennent les défis relevés, les barrières non surmontées et les leçons apprises mentionnés et perçus?;
- h) **selon moi**, qu'est-ce qui pourrait être fait différemment pour relever les défis et surmonter les barrières mentionnés et perçus, pour régler ou éviter les problèmes mentionnés?

Les éléments de réponse à ces questions sont annotés sur la fiche pendant et après la seconde écoute. Cette seconde écoute permet en outre de bonifier les notes et les citations directes tirées des pistes audio lors de la première écoute. Elle permet d'identifier les citations qui représentent le plus fidèlement les propos du participant et de préciser le contexte de la discussion qui l'entoure. De cette manière, cette seconde écoute évite d'utiliser une citation directe hors de son contexte et d'en donner une interprétation différente, voire incorrecte.

Dans quelques cas, la seconde écoute a mené à des questions n'ayant pas été couvertes lors de l'entrevue. Lorsque ces questions étaient peu nombreuses et spécifiques, le courrier électronique a été utilisé pour obtenir des réponses complémentaires. Pour trois entrevues réalisées avec des responsables du service des ressources matérielles de CSS, une discussion de suivi a été organisée pour obtenir les réponses complémentaires. Cette discussion a aussi été une occasion de valider auprès du participant que l'interprétation de ses propos est juste et représente fidèlement son expérience vécue. Cette discussion de suivi avec les CSS a été nécessaire avec les participants ayant le plus d'expérience liée à l'opération et la maintenance d'ATC. Les participants qui n'ont pas mentionné du tout ou très peu de défis relevés, de barrières non surmontées, de leçons apprises et de problèmes vécus n'ont pas fait l'objet d'un tel suivi. Les métriques utilisées pour juger si un participant a plus ou moins d'expérience liée à l'opération et la maintenance d'ATC sont : le nombre total de saisons de chauffage complétées, le nombre et la fréquence de remplacement de certains composants, le coût approximatif des remplacements et le recours à une stratégie de maintenance préventive.

Le troisième cycle d'analyse est la classification des données. Les éléments qui ressortent des secondes écoutes des pistes audio sont catégorisés selon la similarité des défis à relever, des leçons apprises et des pratiques de mise en œuvre identifiés lors du cycle d'analyse précédent. Ce troisième cycle d'analyse est à la fois déductif et inductif : déductif parce que certains défis potentiels qui ont été identifiés dans la revue de la littérature sont utilisés pour catégoriser ceux identifiés dans les données extraites des entrevues; inductif parce que les données extraites des entrevues sont regroupées pour catégoriser les pratiques actuelles et les leçons apprises, pour identifier d'autres défis qui n'ont pas été soulevés par la revue de la littérature et pour préciser les défis potentiels soulevés par la revue de la littérature avec des cas spécifiques aux ATC. Ce

cycle d'analyse vise donc à faire des liens entre les données extraites des entrevues de plusieurs participants, « à déterminer ce qu'elles veulent dire » [traduction libre] comme le mentionne Leedy et al. (2019, p. 351), ainsi qu'à faire des liens entre les données et les défis potentiels tirés de la revue de la littérature. Ces liens avec la revue de la littérature assurent la validité externe de la méthode d'analyse parce que les données utilisées pour dresser ces liens proviennent de sources distinctes.

Le quatrième et dernier cycle d'analyse est la synthèse. C'est cette synthèse qui est présentée dans ce mémoire. Pour chacune des phases de la mise en œuvre d'ATC identifiées au début de ce chapitre, les buts de cette synthèse sont de :

1. Cerner les pratiques actuelles et le contexte dans lequel les projets de mise en œuvre d'ATC se sont déroulés;
2. Identifier ce qui devrait être amélioré dans les pratiques actuelles;
3. Dégager les bonnes pratiques à adopter dans les projets futurs;
4. Dégager des recommandations pour poursuivre la facilitation.

Comme mentionné au début de ce chapitre, une version analogue de cette synthèse a été publiée dans le Rapport technique. Pour assurer la validité des constats, des bonnes pratiques et des recommandations issus de ce dernier cycle d'analyse, un atelier de travail et de partage d'expérience a eu lieu avant la publication du Rapport technique. Cet atelier a réuni l'auteur et la directrice de mémoire ainsi que des personnes issues de milieux variés, notamment gouvernementaux (ministère, société d'État, CSS), scientifiques, professionnels et techniques. Cet atelier a permis une validation externe de la synthèse présentée dans le Rapport technique, de même que celle présentée dans ce mémoire.

3.3 Résultats de l'analyse des données extraites des entrevues

Cette section présente les résultats de l'analyse des données extraites des entrevues effectuée en suivant la méthode présentée dans la section précédente. Les trois sous-sections qui suivent portent chacune sur une phase de la mise en œuvre, soit dans l'ordre de présentation : l'opération, la maintenance et la conception. Chaque sous-section présente les participants aux entrevues ayant acquis une expérience personnelle liée à cette phase, les pratiques actuelles, les défis relevés et les leçons apprises qui sont liés à ces pratiques.

3.3.1 Opération

Cette sous-section sur l'opération d'ATC hydroniques présente les constats relatifs à la mise en service, le suivi de l'opération et le suivi de la performance. Le Tableau 3.3 présente les caractéristiques des treize participants aux entrevues inclus dans cette synthèse. En accord avec les directives du Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS, l'identité des participants est anonymisée en attribuant à chacun un numéro « ID » apparaissant au Tableau 3.3. La colonne « Employeur » indique l'emploi dans le cadre duquel le participant a acquis son expérience d'opération. Les deux catégories de candidats identifiées à l'étape 2 de la méthodologie sont présentes parmi les participants :

- 1) les participants 1 à 7 et 11 à 13 veillent à l'opération de bâtiments qui comportent des ATC hydroniques dans leur emploi au sein du service des ressources matérielles d'un CSS ou du service d'exploitation de la Société québécoise des infrastructures (SQI);
- 2) les participants 8 à 10 travaillent pour des entreprises de services écoénergétiques (ESE) et des firmes de génie-conseil ayant réalisé des mandats pour des clients du secteur institutionnel, dont des CSS¹⁵, au cours desquels ils ont acquis une expérience liée à l'opération d'ATC hydroniques.

¹⁵ Il est à noter que certains de ces CSS sont l'employeur des participants 1 à 7. Ainsi, quelques bâtiments et ATC abordés avec les participants 1 à 7 et 8 à 10 sont les mêmes. L'objectif visé par les entrevues n'a pas nécessité de demander aux participants concernés de distinguer leurs réponses spécifiquement pour ces quelques « doublons ».

Tableau 3.3 Caractéristiques des participants ayant une expérience personnelle liée à l’opération d’ATC hydroniques
Adapté de D’Avignon (2022, p. 30)

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		14	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		nd	nd	nd	nd
10	Firme de génie-conseil	1	~ 2	nd	nd
11	SQI-Exploitation	4	~ 7	2018	~ 4
12		> 2	> 15	2009	nd
13		1	9	2009	108

Le Tableau 3.3 indique le nombre de bâtiments et d’ATC hydroniques sur lesquels repose l’expérience acquise par chaque participant. Certains, par exemple les participants 2 et 10, ont une expérience limitée puisqu’uniquement basée sur deux ATC installés dans un bâtiment. D’autres participants ont à l’inverse une expérience plus étendue, allant jusqu’à 30 ATC installés dans 18 bâtiments dans le cas du participant 5. L’année d’installation du 1^{er} ATC et le nombre total de saisons de chauffage complétées sont des indicateurs de l’historique d’opération : ils indiquent depuis quand les ATC sous la charge du participant sont installés et depuis combien de saisons de chauffage ils sont utilisés en date de 2021. Pour les participants 1 à 7 et 11 à 13, appartenant à la catégorie 1) décrite précédemment, l’année d’installation du 1^{er} ATC ne correspond pas nécessairement avec le début de leur emploi. Ces indicateurs montrent que les entretiens couvrent une large gamme d’expériences et tiennent compte des changements technologiques apportés à l’ATC qui ont été abordés dans la revue de la littérature (p. ex. briques, relais SSR, moteur du ventilateur), ainsi que l’accréditation de techniciens pour l’assemblage de l’ATC quelques années après les installations pilotes de 2006. Ces changements peuvent différencier les expériences des participants. Par exemple, les participants 3 et 5 ont acquis une expérience sur des ATC installés depuis 2008 et 2006

respectivement, soit au début de la commercialisation, alors que d'autres l'ont acquise sur des ATC installés plus récemment, allant jusqu'à 2018 (ID 11). Le nombre total de saisons de chauffage et le nombre d'ATC indiquent que les participants 3 et 5 ont également acquis de l'expérience avec des ATC installés plus récemment. Leur expérience peut ainsi être comparée à celle des autres participants.

Les mentions « nd » dans le Tableau 3.3 indiquent que les données sont non disponibles. Le tilde (~) est utilisé lorsque le participant a mentionné que les données fournies étaient approximatives. Finalement, le symbole « > » utilisé pour le participant 12 indique que son expérience d'opération est liée à « au moins » 15 ATC installés dans 2 bâtiments, en l'absence de données plus précises sur les autres installations. Les données présentées dans le Tableau 3.3 sont donc partielles et elles n'ont pas pu toutes être vérifiées par d'autres moyens que les échanges lors de l'entrevue et à la suite de celle-ci (p. ex. inventaire du stockage thermique dans les CSS (Ido, 2020), visite, facture, registre de maintenance, photo).

3.3.1.1 Mise en service

La mise en service d'un système de stockage thermique joue un rôle crucial sur la performance qui en découle, tel que mis de l'avant dans la revue de la littérature. L'installation de l'ATC, qui inclut l'assemblage des briques, des éléments chauffants et de l'isolant ainsi que le raccordement électrique et hydraulique, constitue une étape importante de la mise en service. Les entrevues avec les participants n'ont pas relevé de problématique répandue ou de défi particulier liés à l'installation, indiquant que les pratiques actuelles d'installation conviennent. Le seul cas méritant mention est celui du participant 5 dont certains ATC, parmi ceux installés en 2006, ont connu des bris d'éléments chauffants liés à de mauvaises techniques d'installation et ont nécessité un remplacement après entre une et deux saisons d'utilisation. Les éléments chauffants étant en céramique, ils doivent être manipulés avec précaution au moment de l'insertion dans les briques. Peu après 2006, les techniciens qui assemblent les briques et les éléments chauffants ont reçu une formation à cet effet. Par la suite, cette problématique n'a pas été vécue par ce même participant (ID 5) qui a procédé à des installations subséquentes, ni par

les autres participants dont ceux ayant des ATC qui datent de 2008-2009 (ID 3, 12 et 13). Les pratiques d'installation ont donc été améliorées après les premiers projets pilotes, rendant peu probable que des bris hâtifs d'éléments chauffants se reproduisent lors de futures installations.

L'implantation des séquences de contrôle est la seconde étape importante de la mise en service d'un système de stockage thermique qui, tel que soulevé dans la revue de la littérature, exige une attention particulière. Or, les entrevues ont exposé le fait qu'il n'y a pas eu de validation « particulière » des séquences de contrôle lors de la mise en service de l'ATC : cette validation n'était pas différente de celle d'un équipement conventionnel de chauffage (p. ex. une chaudière). Cette validation prend nécessairement plus de temps dans le cas d'un système de stockage thermique qu'un équipement conventionnel, puisqu'il faut valider les séquences de charge, puis celles de décharge et qu'elles sont interdépendantes. En plus, les conditions d'opération varient pendant cette validation et diffèrent des conditions nominales considérées en conception (p. ex. besoins thermiques à combler, puissance électrique appelée du bâtiment). Les pratiques actuelles d'implantation et de validation des séquences ont ainsi amené plusieurs participants à y apporter des changements après la mise en service afin que l'ATC comble les besoins thermiques et contribue à la gestion de la demande d'électricité du bâtiment. Les principaux changements apportés furent :

- ajustements aux horaires de charge de l'ATC;
- ajout d'une connexion Web à un serveur météo pour incorporer une prévision de température extérieure, donc une prévision des besoins de chauffage à combler;
- ajustement de la température maximale des briques (canal CLoc040);
- ajustement de la consigne de température des briques;
- ajustement des paramètres du contrôleur de l'ATC pour corriger des problèmes d'intégration avec le BMS;
- ajustement de la puissance de délestage mensuelle (équivalent à la puissance d'écrtage);
- ajustement des consignes de température de l'eau du réseau de chauffage (p. ex. selon le mode occupé et inoccupé);
- ajustement de la séquence d'ouverture et de modulation des robinets des réseaux périmétriques de chauffage à eau chaude.

Parmi ces changements, les trois derniers ne sont pas uniquement dus à l'installation d'ATC, mais sont inhérents au remplacement d'équipements non électriques desservant un réseau de chauffage centralisé (p. ex. chaudière au combustible) par des équipements électriques (p. ex. chaudière électrique, ATC). L'opération du réseau de chauffage doit en effet être ajustée pour réduire l'impact des équipements de chauffage électrique sur la puissance appelée du bâtiment.

Un des paramètres le plus fréquent à ajuster a été la consigne de température des briques, c'est-à-dire la quantité d'énergie que l'ATC doit stocker. Tel qu'évoqué dans la revue de la littérature, cette consigne doit être modulée pour combler les besoins thermiques sans maintenir une quantité inutilement élevée d'énergie stockée, afin de réduire les pertes thermiques et de limiter l'impact sur la durée de vie des éléments chauffants. L'ajustement de cette consigne durant la période de rodage a été un défi à relever pour plusieurs participants, particulièrement ceux dont l'ATC est utilisé comme **source principale de chauffage**.

Par ailleurs, la plupart des changements listés portent sur des paramètres qui ne sont que partiellement ou pas du tout définis dans les séquences spécifiées aux plans et devis, dont certaines ont pu être consultées à la suite des entrevues et qui seront abordées dans la sous-section 3.3.3. Les professionnels en contrôle n'ont pas plus fait d'ajustement à ces paramètres au moment de la mise en service. La conséquence principale de ces pratiques est de repousser, jusqu'à 1 ou 2 hivers suivant la mise en service, l'implantation d'une séquence de contrôle « fonctionnelle », c'est-à-dire qui dessert adéquatement le chauffage et qui s'inscrit dans la gestion de la demande d'électricité du bâtiment. Plusieurs participants qualifient cette période de rodage des séquences de contrôle comme étant longue par rapport à des équipements conventionnels de chauffage (p. ex. chaudière). Lorsque le projet est réalisé en mode traditionnel¹⁶, c'est ultimement l'opérateur de bâtiment qui doit corriger les lacunes de la mise en service (ID 1 et 3) ou recourir aux services d'une entreprise en contrôle pour le faire (ID 2). Lorsqu'une ESE réalise un projet d'économies d'énergie garanties (EEG), cette responsabilité

¹⁶ Le mode « traditionnel » désigne le processus effectué par le donneur d'ouvrage (p. ex. un CSS) pour réaliser un projet (p. ex. rénover une chaufferie et installer un ATC) qui englobe : les appels d'offres (publics pour le secteur institutionnel), la conception, les soumissions et la construction (Lambert, 2021).

lui revient puisqu'elle se charge de la mise en service et du suivi de l'opération pendant les premières années. Les difficultés découlant de la mise en service vécues par le participant 8, à l'emploi d'une ESE, l'ont dans un cas mené à installer un équipement supplémentaire de chauffage (p. ex. chaudière) au cours du premier hiver et l'ont dans un second cas mené à installer un ATC supplémentaire avant ce premier hiver. La consommation d'énergie saisonnière de ces équipements supplémentaires présentée dans le Rapport technique indique qu'ils sont peu utilisés après que la période de rodage ait été complétée. Il apparaît d'une part qu'une validation plus approfondie des séquences de contrôle permettrait d'éviter ces mesures correctives. D'autre part, autant les projets réalisés en mode traditionnel qu'EEG ont respectivement amené l'opérateur de bâtiment (ID 1 et 3) et l'employé de l'ESE (ID 8), à relever des défis similaires à la suite de la mise en service. La difficulté du rodage des séquences vient du fait qu'il est spécifique à chaque bâtiment, puisqu'étroitement lié à l'opération des autres équipements de chauffage et aux stratégies de gestion de la demande d'électricité. Avec les pratiques actuelles, il faut donc effectuer le rodage au cas par cas. Cette difficulté perdure au-delà de la mise en service, durant l'étape du suivi de l'opération et ce, même pour les participants qui ont fait quelques mises en service d'ATC.

3.3.1.2 Suivi de l'opération

Le suivi de l'opération consiste à veiller au fonctionnement adéquat de l'ATC. Toutefois, le rodage des séquences de contrôle s'y ajoute puisqu'il n'est pas totalement complété lors de la mise en service. Les pratiques actuelles font en sorte que cette étape ne relève pas uniquement d'un « suivi » comme elle le devrait, mais elle vise dans un premier temps à rendre l'ATC « fonctionnel », c'est-à-dire s'assurer qu'il comble les besoins de chauffage tout en participant à la gestion de la demande d'électricité du bâtiment.

D'après l'analyse des entrevues avec les opérateurs de bâtiments (ID 1 à 7 et 11 à 13), leurs pratiques actuelles de suivi de l'opération de l'ATC s'apparentent à celles qu'ils ont l'habitude d'utiliser pour une chaudière à eau chaude. La plupart considèrent en effet la décharge de l'ATC de manière analogue au fonctionnement d'une chaudière, en ce sens que : l'ATC

chauffe l'eau jusqu'à la consigne de température demandée, qui est dans la même gamme de températures que celle d'une chaudière, et il la maintient pendant un certain temps au cours de la décharge. Or, le contrôle de l'ATC diffère de celui d'une chaudière, puisque c'est un système de stockage thermique. L'ATC doit être chargé **à l'avance**, en fonction des besoins anticipés à combler, contrairement à une chaudière qui est opérée en fonction du besoin instantané de chauffage. Des problématiques relevées lors des entrevues indiquent que les pratiques usuelles de suivi de l'opération d'une chaudière doivent être adaptées à la **nature prévisionnelle du contrôle de l'ATC**, plutôt que réactionnelle du contrôle d'une chaudière. En fait, les séquences de contrôle implantées dès la mise en service devraient prévoir des moyens de pallier des situations où un bogue empêche le cours normal de la charge de l'ATC, ce qui impacte la décharge qui s'ensuit, tel qu'en témoignent les exemples suivants vécus par les participants :

- perte de communication entre contrôleurs au moment où l'ATC doit se charger (ID 1);
- atteinte de haute limite de température dans l'échangeur de chaleur de l'ATC, empêchant la charge et la décharge et nécessitant une intervention sur place (ID 6, 8)¹⁷;
- défaillance du système de mesurage de la puissance électrique appelée du bâtiment qui permet d'évaluer la puissance disponible pour charger l'ATC (ID 1).

De telles problématiques ont été corrigées par des ajouts aux séquences, indiquant que l'aspect prévisionnel du contrôle de l'ATC est incorporé au fur et à mesure que l'expérience d'opération est acquise. Cela indique d'une part que la validation des séquences lors de la mise en service est **insuffisante** et d'autre part, que cette **expérience d'opération doit être acquise** tant par les opérateurs de bâtiments où les ATC ont été installés par des projets réalisés en mode traditionnel (ID 1 et 6) que par les professionnels ayant réalisé des projets d'EEG (ID 8).

De plus, de telles problématiques sont le plus souvent détectées via l'interface du BMS, lorsque l'ATC est une source principale de chauffage et que la température de l'eau atteint le seuil

¹⁷ Pour l'ID 6, cette problématique coïncide avec le fait qu'un ATC de ce CSS est opéré avec un débit d'eau très faible (inférieur de 74% à la valeur spécifiée aux plans et devis), ce qui réduit considérablement la puissance thermique transférée par l'échangeur et peut le mener à atteindre des températures trop élevées. Pour l'ID 8, cette problématique est surtout liée à des pannes électriques qui ont forcé l'arrêt de la pompe avant le moteur du ventilateur, engendrant une hausse soudaine de la température de l'eau dans l'échangeur de chaleur de l'ATC.

déclenchant une alarme, ou bien via l'opérateur qui suspecte un problème et effectue des vérifications manuelles. Certes, le contrôleur de l'ATC affiche des codes d'erreurs, mais ceux-ci servent à diagnostiquer des problématiques liées à son propre fonctionnement. Ces codes d'erreurs n'aident pas à détecter les problématiques qui sont plutôt liées à l'intégration de l'ATC avec les autres systèmes du bâtiment. C'est ce qui peut expliquer que les opérateurs y recourent peu, emploient l'interface du BMS et font des vérifications manuelles. Cette méthode de détection par des vérifications manuelles indique que les alertes du BMS ne détectent pas les problèmes d'opération spécifiques de l'ATC. Cette méthode coïncide le plus avec les cas où l'ATC est utilisé comme source complémentaire de chauffage, c'est-à-dire qu'il se décharge surtout lors des périodes de pointe et qu'il est combiné à d'autres équipements qui comblent une part élevée des besoins. Il est ainsi difficile pour l'opérateur d'identifier la **source** du problème, par exemple la pompe de l'ATC, son ventilateur, une de ses sondes de température ou bien le système de mesurage de la puissance électrique appelée du bâtiment, et conséquemment la **personne à contacter** pour le régler, par exemple un technicien en contrôle, un électricien ou un plombier. À ce titre, le Rapport technique témoigne que, **tout au long de l'hiver 2020-2021**, un ATC parmi les 18 étudiés a été utilisé avec un débit d'eau inférieur de 74% à la valeur spécifiée aux plans et devis et qu'un autre n'a pas pu se décharger dû à son ventilateur défaillant. Ces deux ATC sont installés dans des bâtiments de CSS différents, donc ces problématiques ne peuvent être attribuées aux pratiques d'un seul CSS. Le manque de données affichées sur l'interface du BMS permettant d'effectuer le suivi d'opération de la pompe et du ventilateur de l'ATC a été soulevé (ID 6).

Deux constats ressortent des pratiques actuelles de suivi de l'opération :

- 1) les lacunes de la mise en service qui perdurent sont laissées à la merci de l'expertise et des ressources dont dispose le personnel chargé du suivi de l'opération, au risque de ne pas être corrigées;
 - 2) le BMS est sous-utilisé pour le diagnostic de fautes touchant l'opération de l'ATC, soit parce qu'il n'alerte pas assez tôt les opérateurs ou parce qu'il n'est pas assez spécifique.
- Ces constats réitérent que les pratiques actuelles devraient être améliorées pour que ces défis qui se présentent lors du suivi de l'opération aient déjà été adressés au moment d'implanter les

séquences de contrôle et les alertes sur l'interface du BMS. Un travail en amont, lors de la conception, doit donc être fait en ce sens.

3.3.1.3 Suivi de la performance

Le suivi de la performance vise à optimiser la consommation et l'impact énergétiques de l'ATC. L'analyse des données extraites des entrevues a montré que, dans les pratiques actuelles, ce suivi est principalement fait au niveau du bâtiment, à partir des factures énergétiques. Au niveau de l'ATC, le suivi de la performance porte principalement sur l'ajustement de la consigne de température des briques afin de limiter les pertes thermiques (donc augmenter le rendement énergétique) et d'améliorer la gestion de la demande d'électricité (p. ex. par déplacement).

Cette consigne se présente, dans les cas discutés lors des entrevues, sous la forme d'une courbe liant la consigne de température des briques à la température extérieure, soit actuelle ou prévue. Cet ajustement est fait tout en s'assurant de ne pas affecter la capacité de l'ATC à combler les besoins de chauffage. Les méthodes d'ajustement actuellement utilisées reposent essentiellement sur des essais et erreurs : tester des consignes, comparer les résultats avec le même bâtiment et d'autres bâtiments et retenir l'ajustement qui fonctionne le mieux. Les outils utilisés sont principalement les factures énergétiques et les données d'opération enregistrées par le BMS. Dans la majorité des cas couverts par les entrevues, cet ajustement est fait directement dans le BMS, ce qui est possible lorsque le contrôleur de l'ATC est en « Mode manuel de contrôle de la charge » introduit au paragraphe 1.2.2.6 de la revue de la littérature. Ajuster la courbe de consigne de températures des briques est ainsi accessible pour l'opérateur, mais établir comment l'ajuster pour un réseau de chauffage donné est en revanche un défi à relever. Cet ajustement contribue à allonger la période de rodage suivant la mise en service pendant laquelle l'impact énergétique visé de l'ATC n'est pas totalement atteint. Les entrevues avec les participants n'ont pas exposé le recours au mesurage de la puissance électrique appelée par l'ATC, ni à un système de gestion de l'énergie (SGE) qui permettrait de prétraiter les

données d'opération brutes et de produire des analyses sommaires, donc de mieux guider cet ajustement que des essais et erreurs.

Bien que l'ajustement de cette courbe doit être accessible, l'analyse de certaines entrevues (ID 2, 4, 5 et 10) témoigne que les conséquences sur la durée de vie des éléments chauffants, associées à un ajustement inadéquat, ne sont pas évidentes à cerner lors d'une première expérience. Cela a vraisemblablement mené à des enjeux de maintenance.

3.3.2 Maintenance

Cette sous-section présente les constats liés à la maintenance des ATC hydroniques tirés des entrevues avec les treize participants qui ont été présentés dans le Tableau 3.3. Les participants 1 à 7 et 11 à 13 occupent des emplois directement liés à la maintenance d'ATC dans les bâtiments de CSS ou de la SQI sous leur responsabilité. Les professionnels travaillant pour des ESE (participants 8 et 9) effectuent des suivis au moins annuels des projets d'EEG, d'où l'expérience de maintenance acquise en demeurant en contact étroit avec leurs clients pendant plusieurs années. Dans le cas du participant 10, il a acquis ce type d'expérience en réalisant un mandat d'expertise sur les ATC d'un bâtiment institutionnel.

Le Tableau 3.4 à la page 83 présente les données qui ont été collectées sur les remplacements de composants. Les principaux composants de l'ATC hydronique y sont listés et la plupart ont été présentés dans la revue de la littérature. Les lignes grises au bas du tableau indiquent qu'aucun remplacement n'a été relevé pour ces quatre composants. En revanche, le moteur du ventilateur est le composant ayant le plus de mentions de remplacement de la part des participants, suivi des éléments chauffants. La colonne « ID » désigne le numéro des participants ayant rapporté au moins un remplacement de composant. Le nombre d'ATC concernés par ces remplacements est indiqué, lorsque disponible. La mention « nd » indique qu'une donnée n'est pas disponible, rappelant que les données présentées sont partielles. La colonne « Type » indique si le remplacement du composant a été effectué à titre curatif (C) ou préventif (P) et si le participant a qualifié le remplacement curatif comme étant récurrent (C-

R). Dans cette même colonne, la désignation « D » indique que le composant défaillant n'a pas été remplacé, mais que l'ATC a plutôt été démantelé (D). Le Tableau 3.4 comporte une seule désignation de type D. Elle concerne les briques de l'ATC et le mandat d'expertise confié au participant 10 mentionné précédemment. Les trois dernières colonnes indiquent respectivement le coût unitaire approximatif, la fréquence des remplacements et le temps approximatif requis pour exécuter le remplacement tels que rapportés par les participants. Pour les éléments chauffants, une unité (un.) correspond à une paire, puisque ceux-ci sont vendus et habituellement remplacés en paires. Il est à noter que les coûts approximatifs n'incluent aucune correction relative à l'inflation, au transport et n'ont pas pu être vérifiés à l'aide de factures. Dans la colonne « Fréquence », les désignations suivantes sont utilisées : « après » pour les remplacements curatifs ponctuels (C), « aux » pour les remplacements curatifs récurrents (C-R) et « chaque année » pour les remplacements annuels préventifs (P). Les paragraphes 3.3.2.1 et 3.3.2.2 qui suivent présentent les constats relatifs à la maintenance curative, puis préventive.

Tableau 3.4 Informations sur les remplacements curatifs et préventifs
des composants de l'ATC hydronique tirées des entrevues
Adapté de D'Avignon (2022, p. 35)

Composants	ID	Nb ATC	Type	Coût approx. (\$)	Fréquence	Temps approx.
Moteur du ventilateur	1	nd	C-R	500-600	Aux 2-3 ans	2-3 h
	2	1	C	nd	Après 7 ans	3 h
	3	nd	C	nd	Après 10 ans	1,5 h
	4	~ 4-5	C	1 000	Après 2-5 ans	2 h
	5	nd	C	nd	nd	nd
	7	2	C	nd	nd	nd
	8	nd	C-R	1 000	Aux 2-3 ans	nd
	11	1	C	nd	Après 1 an	nd
	12	1	C	nd	Après 1 an	nd
	13	4	C	800	Après ~6 ans	4 h
Éléments chauffants*	2	1	C	15 000 /18 un.	Après 8 ans	1-1,5 jrs /18 un.
	5	nd	C	800/un.	Après 8-10 ans	2 h/un.
Éléments chauffants et isolant**	4	3	C-R	12-15 000 /12 un.	Après 8-10 ans	1-2 jrs /12 un.
Briques	10	~ 2	D	s. o.	Après ~15ans	s. o.
Pompe	1	1	C	nd	Après 3 ans	nd
Condensateur du moteur du ventilateur	1	nd	P	10	Chaque année	1 h
Fusibles	1	nd	P	nd	Chaque année	nd
Sonde de température des briques	1	1	C	nd	Après 3 ans	nd
Sonde de haute limite de température de l'échangeur de chaleur	6	3	C	100	Après 4-6 ans	1 h
Contrôleur et interface BACnet™	7	1	C	1 100	nd	nd
Panneau élec. et composants						
Panneau SSR et composants						
Sonde de température de l'eau à la sortie de l'échangeur de chaleur						
Échangeur de chaleur						
*Une unité (un.) correspond à une paire d'éléments chauffants. Le modèle de 80 kW comprend 18 paires.						
**Le coût et le temps approximatifs sont pour le remplacement des éléments chauffants (12 un.) et de l'isolant.						

3.3.2.1 Maintenance curative

Le Tableau 3.5 combine les données sur les remplacements curatifs tirées du Tableau 3.4 et les caractéristiques des participants tirées du Tableau 3.3. Seules les données sur les moteurs de ventilateurs et les éléments chauffants y sont compilées, étant les deux principaux composants remplacés de manière curative (types C et C-R). Des remplacements curatifs d'une pompe, de sondes de températures et d'un contrôleur sont aussi indiqués dans le Tableau 3.4, mais ils n'ont pas fait l'objet d'analyse approfondie étant donné le faible nombre de mentions et le peu d'information permettant de cerner les causes probables de défaillance.

Tableau 3.5 Compilation des remplacements de moteurs de ventilateurs et d'éléments chauffants

ID	Nb ATC	Année d'installation du 1 ^{er} ATC	Nb total de saisons de chauffage	Rempl. moteur du ventilateur		Rempl. éléments chauffants	
				Oui/Non	Nb	Oui/Non	Nb
1	19	2011	99	Oui	nd	Non	s. o.
2	2	2012	18	Oui	1	Oui	1
3	16	2008	85	Oui	nd	Non	s. o.
4	6	2011	53	Oui	~ 4-5	Oui	3
5	30	2006	339	Oui	nd	Oui	nd
6	5	2015	30	Non	s. o.	Non	s. o.
7	11	2012	52	Oui	2	Non	s. o.
8	12	2016	57	Oui*	nd	Non	s. o.
9	nd	nd	nd	Non	s. o.	Non	s. o.
10	~ 2	nd	nd	Non	s. o.	Non	s. o.
11	~ 7	2018	~ 4	Oui	1	Non	s. o.
12	> 15	2009	nd	Oui	1	Non	s. o.
13	9	2009	108	Oui	4	Non	s. o.
Nb total de mentions « Oui » / Nb ID				10/13	s. o.	3/13	s. o.
Nb total de remplacements / Nb ATC**				s. o.	~ 12-13/57	s. o.	~ 4/104
*Les remplacements de moteurs mentionnés par l'ID 8 ont eu lieu lors d'un mandat réalisé pour le CSS qui emploie l'ID 1. Comme l'ID 1 a aussi eu à en faire remplacer, il y a une possibilité de double comptage dans le <i>Nb total de mentions «Oui» / Nb ID</i> de 10/13 apparaissant au bas du tableau. Il n'a pas été possible de confirmer que les remplacements mentionnés par l'ID 8 et 1 concernaient les mêmes ATC. Ce ratio serait plutôt de 9/12 en cas de double comptage, donc l'impact est négligeable (~2%).							
**La valeur <i>Nb ATC</i> dans ce ratio est calculée en faisant la somme des valeurs de la 2 ^e colonne du tableau, lorsque le nombre de remplacements dans les colonnes « Nb » est disponible (c.-à-d. pas « nd »).							

Cette compilation montre que 10 des 13 participants ont mentionné avoir eu à remplacer au moins un moteur de ventilateur et que le nombre d'ATC concernés est d'environ 12 à 13 ATC sur 57. Les données sur le nombre d'ATC concernés par ces remplacements sont partielles et n'ont pu être obtenues de la part des participants 1, 3, 5 et 8 ayant le plus d'ATC sous leur responsabilité. Néanmoins, elles indiquent que le moteur du ventilateur est le composant le plus sujet à défaillir de l'ATC hydronique, constat par ailleurs similaire à celui établi dans la sous-section 1.1.1 de la revue de la littérature pour d'autres systèmes de stockage thermique. Le Tableau 3.5 montre en revanche un nombre moins élevé de mentions de remplacement d'éléments chauffants. Trois des treize participants ont eu à en remplacer et le nombre d'ATC concernés est relativement bas, soit 4 ATC sur 104. Rappelons que ces données sont partielles : le participant 5, ayant le nombre d'ATC installés et le nombre de saisons de chauffage complétées les plus élevés, a eu à remplacer des éléments chauffants, mais il ne pouvait se prononcer sur le nombre d'ATC concernés. Même si les remplacements d'éléments chauffants ont un taux de mentions et un taux d'ATC concernés plus bas que les remplacements de moteurs, le coût matériel de plusieurs éléments chauffants, qui s'élève jusqu'à environ 15 000\$ pour 18 paires, et le temps requis pour les remplacer, qui peut aller d'une à deux journées de travail, justifient d'y accorder une attention particulière dans ce mémoire.¹⁸

Dans ce qui suit, le contexte entourant ces remplacements curatifs de moteurs et d'éléments chauffants est présenté afin d'exposer les causes **potentielles** de défaillance cernées lors des entrevues. Le but est de préciser l'opération à préconiser de l'ATC hydronique, afin de réduire le plus possible les interventions de maintenance curative, ce qui s'inscrit toujours dans l'objectif d'en faciliter la mise en œuvre. Advenant des changements technologiques à ces composants par rapport à ce qui a été présenté dans la sous-section 1.2.2 de la revue de la littérature, il faudrait s'assurer que les constats présentés ci-après s'appliquent toujours.

¹⁸ Le modèle de 53 kW et celui de 80 kW comprennent respectivement 12 et 18 paires d'éléments chauffants. Le Tableau 3.4 fait état de remplacements de plusieurs paires d'éléments chauffants sur un même ATC par les participants 2 et 4, dont les coûts matériels avoisinent 33% (1/3) du coût d'achat de l'ATC.

Moteur du ventilateur

Les entrevues ont permis de cerner trois types de défaillance du moteur du ventilateur, soit :

- a) une défaillance quelconque dès la mise en service nécessitant un remplacement au cours de la première année d'utilisation (ID 11 et 12),
- b) une défaillance liée à la dégradation progressive de l'état du moteur menant à son remplacement après quelques années d'utilisation, variant entre 2 et 10 ans, qui aurait possiblement pu être atténuée par un entretien préventif annuel (ID 2 à 5, 7 et 13),
- c) une défaillance menant à des remplacements récurrents, aux 2 à 3 ans, particulièrement sur des ATC utilisés comme source principale de chauffage dont les moteurs sont amenés à fonctionner à basse vitesse pendant des périodes prolongées (ID 1 et 8).

Le type de défaillance a) rappelle l'importance d'une mise en service rigoureuse abordée dans le paragraphe 3.3.1.1. Une défaillance après si peu de temps doit être détectée rapidement pour bénéficier de la garantie du manufacturier. Le type de défaillance b) inclut les cas où le moteur a été utilisé pendant quelques années (2-10 ans), a nécessité un remplacement et n'avait pas eu à être remplacé à nouveau au moment de l'entrevue. Les causes potentielles des défaillances de type b) discutées lors des entrevues sont variées, par exemple : une pièce d'attache dévissée a bloqué la rotation du ventilateur; le moteur et le ventilateur étaient encrassés. Ces causes potentielles sont liées à des dégradations progressives qui dépendent des pratiques de maintenance préventive adoptées. Finalement, le type de défaillance c) s'applique aux remplacements curatifs récurrents de moteurs, **malgré l'adoption de pratiques de maintenance préventive**. Les deux participants concernés par ce type de défaillance inspectent et nettoient au moins annuellement le moteur et le ventilateur et ils mesurent la résistance électrique du bobinage du moteur et la capacitance de son condensateur. Ils ont également mesuré le courant électrique appelé par le moteur, qui **à basse vitesse de rotation**, était supérieur à son courant nominal. Il serait donc important de vérifier que le contrôleur de l'ATC ne maintient pas le moteur dans des conditions d'opération qui engendrent un échauffement anormal. Plusieurs de ces ATC sont utilisés comme **source principale de chauffage**, ce qui amène les moteurs à fonctionner pendant un nombre élevé d'heures par saison et, lorsque le besoin de chauffage à combler est faible, à fonctionner à basse vitesse pendant des périodes prolongées (p. ex. quelques jours consécutifs tel que montré sur la figure

12 du Rapport technique). Ces conditions d'opération peuvent accentuer l'échauffement, donc contribuer à l'usure prématurée du moteur. Il est important de respecter les dégagements et la température ambiante (max. 29°C) recommandés par le manufacturier pour que le refroidissement du moteur par convection naturelle s'effectue comme prévu. Le respect de ces paramètres n'a pas pu être confirmé lors des entrevues.

Pour tous les cas de défaillances, c'est le personnel interne du CSS et de la SQI (p. ex. électricien) qui a remplacé le moteur. Il est donc assez simple à remplacer, même lors d'une première expérience avec l'ATC. Le temps requis pour remplacer le moteur (1,5-4h) et son coût (500-1 000\$), indiqués au Tableau 3.4, ne s'avèrent pas non plus des barrières majeures. En fait, la défaillance du moteur a comme principal inconvénient d'empêcher complètement la décharge de l'ATC jusqu'à son remplacement. Ainsi, la détection rapide de la défaillance et l'acquisition des pièces de remplacement impactent le plus le temps de remise en marche, ce qui est d'autant plus critique lorsque l'ATC est la source principale de chauffage. À cet effet, la sous-section précédente a mis en évidence que les alertes affichées par le BMS ne permettent pas de détecter la défaillance du ventilateur, exigeant des vérifications manuelles plutôt qu'automatisées. Le processus d'aller vérifier sur place la nécessité de remplacer le moteur, de l'acheter, de le recevoir et de le remplacer est évidemment retardé par cette détection tardive.

Éléments chauffants

Les entrevues ont permis de cerner deux types de défaillance des éléments chauffants, soit :

- a) une défaillance peu de temps après la mise en service liée à de mauvaises techniques d'installation (ID 5),
- b) une défaillance successive de paires d'éléments chauffants liée à l'exposition à des températures élevées (>700°C) pendant des périodes prolongées nécessitant un remplacement après entre 8 et 10 années d'utilisation (ID 2, 4 et 5).

Le type de défaillance a) a été abordé au début du paragraphe 3.3.1.1 sur la mise en service et n'est plus susceptible de se produire depuis l'accréditation des techniciens qui assemblent l'ATC. Le type de défaillance b) fait référence à la sensibilité des éléments chauffants à l'exposition prolongée à des températures élevées (voir le paragraphe 1.2.2.3). Les

remplacements liés à ce type de défaillance effectués par les participants 2, 4 et 5 témoignent que leurs pratiques de suivi de l'opération n'ont pas permis d'anticiper les impacts qu'un changement à la consigne de températures des briques peut avoir sur la durée de vie des éléments chauffants. Ce n'est qu'à la suite de ces bris que certains d'entre eux ont modifié leurs pratiques, par exemple en modulant la consigne de température des briques en fonction d'une prévision de température extérieure pour stocker la quantité appropriée d'énergie. Contrairement au moteur du ventilateur, les défaillances successives de paires d'éléments chauffants entraînent un **dysfonctionnement partiel et progressif** de l'ATC : la capacité de l'ATC à stocker de la chaleur décroît au fur et à mesure que des paires d'éléments chauffants deviennent hors d'usage.¹⁹ De plus, la défaillance de quelques paires d'éléments chauffants sollicite davantage les autres, ce qui impacte leur durée de vie et accentue le dysfonctionnement, tel que mentionné dans la revue de la littérature.

Les conséquences principales de ces défaillances sur l'opération de l'ATC sont d'allonger le temps requis pour stocker une même quantité d'énergie ou encore de ne pas pouvoir stocker une même quantité d'énergie, notamment si les éléments défaillants sont concentrés dans un même noyau. Il est en effet raisonnable de suspecter que des éléments défaillants, concentrés dans un même noyau, vont augmenter les écarts de température dans les briques, étant donné la conductivité thermique relativement faible des briques (4,3 W/m·K) et les interstices entre celles-ci qui augmentent la résistance thermique à la conduction. D'autre part, l'exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner la fissuration des briques, telle que constatée par le participant 10 sur deux ATC installés depuis une quinzaine d'années qui ont été maintenus à haute température (>700°C). Dans ce cas, le coût pour remplacer les briques et les éléments chauffants a justifié le démantèlement des ATC plutôt qu'une remise en service. Dans les autres cas (ID 2, 4 et 5), les briques n'ont pas été remplacées. Les éléments chauffants ont été remplacés soit par le personnel du CSS (ID 2 et 5) ou par une firme externe (ID 4). Certains participants (ID 2 et 4) ont remplacé tous les éléments chauffants par la même

¹⁹ Comme les paires sont raccordées électriquement en parallèle, la défaillance d'une paire n'affecte pas le fonctionnement des autres paires. Toutefois, comme les deux éléments chauffants de la paire sont raccordés en série, la défaillance d'un élément de la paire affecte l'autre élément.

occasion, même ceux encore fonctionnels, alors que le participant 5 a plutôt remplacé uniquement les paires défailtantes. Pour ces trois participants, le remplacement d'éléments chauffants est perçu comme une « intervention majeure » puisqu'elle requiert une mise hors service de plusieurs jours : entre l'arrêt de l'ATC, le moment où les briques ont suffisamment refroidi pour ouvrir l'ATC et remplacer les éléments, jusqu'à la remise en marche et l'atteinte de la consigne de température des briques. Le coût de plusieurs paires d'éléments chauffants et le temps de main-d'œuvre requis pour les remplacer expliquent aussi ce qualificatif d'intervention majeure. Des précautions doivent être prises lors de l'ouverture de l'ATC, particulièrement en repliant la couverture isolante sur le dessus de l'ATC (voir Figure 1.2), lors du retrait des éléments chauffants défailtants et de l'insertion des nouveaux. Les participants 4 et 5 ont respectivement remarqué l'impact des températures élevées et de l'ouverture annuelle de l'ATC sur la friabilité de la couverture isolante. Dans le cas du participant 4, l'isolant a dû être remplacé au même moment que les éléments chauffants. Le participant 5 a décidé d'éviter d'ouvrir annuellement l'ATC pour remplacer **les quelques** paires défailtantes, pour plutôt l'ouvrir aux 3 ans (ou lorsque nécessaire) afin de remplacer **plusieurs** paires d'éléments chauffants **par la même occasion**. Cela réitère que la défaillance d'éléments chauffants provoque un dysfonctionnement partiel de l'ATC. Le suivi régulier du nombre de paires défailtantes et de leur position (c.-à-d. les noyaux dans lesquelles les paires défailtantes se trouvent), de même que le remplacement **complet** de tous les éléments chauffants lors de l'ouverture de l'ATC sont des pratiques de maintenance adoptées à la suite de ces remplacements. Le suivi régulier permet de planifier cette intervention majeure hors de la saison de chauffage. Malgré tout, les ATC sous la responsabilité des autres participants (ID 1, 3, 6 à 13) n'ont pas connu de défaillances majeures d'éléments chauffants.

Défis relevés et leçons apprises relatifs à la maintenance curative

Les deux principaux défis liés à la maintenance curative sont de : 1) anticiper les composants les plus susceptibles de défailtir et 2) adapter les pratiques d'opération et de maintenance en conséquence. En effet, l'analyse des entrevues a mis de l'avant que **lors d'une première expérience**, les participants n'ont pas su anticiper les potentiels remplacements à faire, ni établir un plan pour desservir les besoins de chauffage lors de la mise hors service de l'ATC

(défi 1). Ils n'ont pas pu lier d'emblée les conditions d'opération de l'ATC à la durée de vie de ses composants, plus particulièrement le fonctionnement du moteur du ventilateur à basse vitesse pendant des périodes prolongées et l'exposition des éléments chauffants à des températures élevées pendant des périodes prolongées (défi 2). À cet effet, la documentation sur la durée de vie des éléments chauffants, dont la Figure 1.4 présentée au paragraphe 1.2.2.3, devrait être incorporée dans le manuel de l'utilisateur plutôt qu'obtenue en la demandant au manufacturier. Comme mentionné dans le paragraphe 3.3.1.2, l'ajustement de la consigne de température des briques est facilement accessible pour l'opérateur via le BMS, mais aucune indication ne lui est donnée, ni dans l'interface du BMS ni dans le manuel de l'utilisateur, quant à l'impact qu'il peut avoir sur la durée de vie des éléments chauffants. Concernant la modulation de la vitesse du moteur, c'est un paramètre sur lequel l'opérateur a peu de contrôle puisqu'elle est fixée par le contrôleur de l'ATC lui-même. Il n'y a pas de mise en garde dans la documentation sur le maintien prolongé de basses vitesses. Des solutions à envisager seraient de : réduire temporairement la consigne de température de l'eau pour éviter que l'ATC comble un faible écart de température en maintenant une basse vitesse; augmenter la vitesse minimale par le canal CLoc028 (la valeur par défaut étant de 1, soit le minimum possible).

De plus, ni le contrôleur de l'ATC ni le BMS, tel qu'implanté selon les pratiques couvertes lors des entrevues, n'incluent une détection automatisée de défaillance du moteur du ventilateur et des éléments chauffants. Cela allonge le délai de détection par l'opérateur et prolonge l'opération déficiente de l'ATC. Dans un cas présenté dans le Rapport technique, l'ATC a été chargé pendant quatre mois, alors qu'une défaillance du ventilateur a empêché sa décharge. Une bonne pratique à adopter est donc d'implanter une détection automatisée de défaillance et de l'afficher directement sur l'interface du BMS.

L'analyse des pratiques actuelles de maintenance démontre que les remplacements **curatifs** de composants ont par la suite amené certains participants à adopter des pratiques de maintenance **préventive**, lesquelles font l'objet du paragraphe 3.3.2.2 qui suit. Afin de faciliter la mise en œuvre des ATC, il serait souhaitable que ces pratiques de maintenance préventive soient adoptées plus tôt que tard pour idéalement éviter, réduire ou repousser la maintenance curative.

3.3.2.2 Maintenance préventive

Le Tableau 3.4 présenté précédemment indique quelques remplacements de condensateurs de moteurs du ventilateur et de fusibles effectués à titre préventif. Le participant 1 a adopté cette pratique de remplacements préventifs annuels à la suite des remplacements curatifs récurrents de moteurs du ventilateur. D'autres participants travaillant pour des CSS (ID 4 à 7) ne procèdent pas à des remplacements préventifs, mais ont tout de même adopté des pratiques de maintenance préventive. Ces pratiques sont adoptées le plus souvent **après** que des remplacements aient été nécessaires. Elles consistent à inspecter, nettoyer et lubrifier le moteur du ventilateur (ID 1, 4 à 7), à mesurer la résistance électrique des éléments chauffants pour détecter des paires défaillantes (ID 1, 4 et 5), à inspecter les connexions électriques avec une caméra thermique (p. ex. dans le panneau de relais SSR) et les resserrer au besoin (ID 1). Les deux principales barrières à l'adoption de pratiques de maintenance préventive **dès les premières saisons d'utilisation** plutôt qu'à la suite de remplacements curatifs, sont :

- 1) le manque de ressources à l'interne dédiées à la maintenance préventive,
- 2) l'ambiguïté des tâches de maintenance préventive à exécuter sur l'ATC.

La première barrière semble être généralisée au sein des services des ressources matérielles de CSS et non pas spécifique à la maintenance préventive des ATC. À titre d'exemples, les entrevues ont exposé les faits que : le budget à la disposition du CSS pour la maintenance préventive est très limité et les interventions sont faites à la suite de bris uniquement (ID 2); le personnel du CSS qui veille à la maintenance des 19 ATC et d'une trentaine de bâtiments au total se limite à deux employés, dont un partira à la retraite imminemment (ID 1). En ayant des ressources assez limitées pour la maintenance des bâtiments, l'ambiguïté des tâches préventives à exécuter sur l'ATC amène le personnel à ne pas s'y attarder jusqu'à ce que des bris surviennent. Comme il y a peu d'information disponible dans la documentation technique sur l'impact des conditions d'opération de l'ATC sur ses composants, cela ne permet pas de cerner les risques encourus en n'effectuant pas de maintenance préventive. Au sujet de cette « ambiguïté », le participant 4 soutient que la maintenance préventive d'un ATC n'est a priori pas évidente à anticiper, comparativement à une chaudière au combustible qu'il a l'habitude d'utiliser et de faire nettoyer régulièrement par une entreprise spécialisée. Les tâches de

maintenance préventive à exécuter sur l'ATC sont aussi ambiguës dans la documentation technique disponible. Par exemple, l'ancienne version du manuel de l'utilisateur indique « qu'aucune maintenance régulière n'est requise, hormis le changement fréquent des filtres à air » [traduction libre] (Steffes, s.d.c, p. 1.03), alors que l'ATC hydronique ne comporte pas de filtre à air.²⁰ La version la plus récente de ce manuel inclut quant à elle une procédure d'inspection annuelle de l'ATC (Steffes, s.d.d, p. A.09). Or, cette procédure ne spécifie aucune tâche préventive liée spécifiquement au moteur du ventilateur, le composant remplacé par le plus de participants et qui mène à un dysfonctionnement total de la décharge. Des documents tels des brochures publicitaires et des présentations comportent les mentions suivantes quant à la maintenance à anticiper sur l'ATC : « Système avec peu d'entretien. » (Moreau & Lemay, 2007), « Faible coût d'entretien. » (Hydro-Québec, 2010) et « Le ThermElect hydronique est un système de chauffage [...] facile à entretenir. » (Steffes, s.d.-e, p. 1), ce qui laisse libre cours à l'interprétation et n'aide pas à adopter des pratiques concrètes de maintenance préventive. Enfin, une présentation donnée par le distributeur de l'ATC au Québec est le **seul document trouvé qui mentionne explicitement de vérifier annuellement l'état du ventilateur** (Desbiens & Groupe Master, 2016). Comme mentionné précédemment, cette ambiguïté des tâches à effectuer mène, dans un contexte de ressources limitées, à délaisser la maintenance préventive sur l'ATC jusqu'à ce que des bris surviennent. Après avoir adopté des pratiques de maintenance préventive sur l'ATC, le participant 1 les qualifie de « comparables » à celles à faire sur une chaudière électrique et le participant 4 les juge de « moindre ampleur » que celles à faire sur une chaudière au combustible.

Face au défi d'adopter des pratiques de maintenance préventive dès les premières saisons d'utilisation, il est particulièrement important de circonscrire les tâches à effectuer pour y allouer les ressources nécessaires. Cela permet ainsi une meilleure planification des interventions de maintenance. Une liste des tâches à exécuter, qui est adaptée au contexte de ressources limitées, est donc une piste de solution appropriée pour relever ce défi et liée au

²⁰ Au moment de rédiger ce mémoire, l'ancienne version du manuel de l'utilisateur était toujours disponible sur le site web du manufacturier (<https://www.steffes.com/ets/downloads/>), pouvant rendre ambiguës les tâches de maintenance préventive à effectuer sur l'ATC.

troisième sous-objectif. L'Annexe V présente la fiche synthèse des tâches de maintenance préventive élaborée dans le cadre de ce projet de recherche. Cette fiche tient compte des pratiques adoptées par les participants afin de l'adapter au contexte de ressources limitées. À ce titre, ces pratiques témoignent qu'ouvrir l'ATC pour inspecter l'état des éléments chauffants et mesurer leur résistance électrique, qui est la procédure d'inspection annuelle proposée par le manufacturier (Steffes, s.d.d, p. A.09), n'est pas adaptée à un tel contexte. D'une part, cette procédure nécessite de soulever la couverture isolante, tout en la manipulant avec précaution, ce qui s'exécute plus aisément à deux personnes. D'autre part, la méconnaissance d'une technique appropriée pour soulever la couverture isolante et le constat des participants 4 et 5 sur la friabilité de celle-ci à la suite d'ouvertures fréquentes et de défaillances d'éléments chauffants, font en sorte qu'il y a une réticence à ouvrir l'ATC. La mesure de la résistance électrique des éléments chauffants peut plutôt être faite par le panneau électrique, sans ouvrir l'ATC. La détection automatisée et affichée sur l'interface du BMS permettrait de suivre l'état des éléments chauffants. Au besoin, une vérification manuelle par le panneau électrique confirmerait s'il y a des paires défaillantes et le cas échéant, dans quels noyaux de briques elles se trouvent. Pour ce qui est des pratiques de maintenance préventive à adopter pour le moteur du ventilateur, elles sont semblables à celles d'autres moteurs, soit : l'inspection, le nettoyage et une lubrification périodiques.

Cette liste de tâches de maintenance préventive ainsi que la détection automatisée des défaillances et affichée sur l'interface du BMS devraient faire partie des documents (p. ex. devis) transmis à l'issue de la conception pour que soit implanté dès la mise en service.

3.3.3 Conception

Cette sous-section présente les constats liés à la conception de systèmes de chauffage incluant l'installation d'ATC hydroniques et est divisée en quatre : la conception préliminaire, l'analyse sommaire de rentabilité, la conception détaillée et l'élaboration des séquences de contrôle. Ces constats sont tirés de l'analyse des entrevues réalisées avec les participants concernés par le questionnaire 2 dont les caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 3.6. Sept des huit

participants ont acquis leur expérience personnelle de conception en tant qu'employés de firmes de génie-conseil et d'ESE, réalisant respectivement des projets en mode traditionnel et des projets d'EEG. Quant au huitième participant (ID 8), à l'emploi du service d'exploitation de la SQI, son expérience relève principalement de l'opération et de la maintenance. La révision des plans et devis des projets à venir dans les bâtiments de la SQI, dont certains comportaient l'installation d'ATC hydroniques, lui a néanmoins permis d'acquérir de l'expérience en conception. C'est pourquoi il est inclus dans cette synthèse. Les entrevues ont porté sur l'expérience acquise par les participants au cours de leur emploi actuel. Les participants 1 à 7 ont tous acquis leur première expérience au cours de leur emploi actuel, alors que le participant 8 l'a acquise dans un emploi antérieur en génie-conseil. Il est à noter que certains participants (ID 3, 6 à 8) inclus dans cette synthèse sur la conception ont également été inclus dans les synthèses sur l'opération et la maintenance présentées précédemment. Leurs numéros « ID » utilisés dans le Tableau 3.6 ne sont pas les mêmes que ceux utilisés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.6 Caractéristiques des participants ayant une expérience personnelle de conception incluant l'installation d'ATC hydroniques
Adapté de D'Avignon (2022, p. 41)

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

L'implication personnelle des participants en conception d'installations d'ATC hydroniques est indiquée dans la troisième colonne du Tableau 3.6 : « CP » désigne la conception

préliminaire, « AR » désigne l'analyse sommaire de rentabilité, « CD » désigne la conception détaillée et « SC » désigne l'élaboration de séquences de contrôle. Chacune de ces étapes de conception et les constats qui s'y rapportent seront présentés dans les paragraphes 3.3.3.1 à 3.3.3.4 qui suivront. Le nombre de bâtiments et l'année de réalisation du 1^{er} projet indiquent l'étendue de l'expérience de chaque participant. Un projet peut inclure plusieurs bâtiments dans un même mandat et chaque bâtiment peut inclure l'installation de plus d'un ATC. Les expériences couvertes par les entrevues varient largement, allant de projets réalisés récemment en 2017-2018 dans 4 bâtiments et moins (ID 1, 2 et 4), à des projets réalisés depuis les installations pilotes de 2006 et totalisant jusqu'à une quarantaine de bâtiments (ID 4). La dernière colonne du Tableau 3.6 indique l'utilisation prévue de l'ATC au moment de la conception. Une utilisation désignée par « source principale » signifie que l'ATC est le **principal** équipement desservant les besoins de chauffage du réseau hydronique, alors que « gestion de pointe » signifie qu'il agit en **complément** d'un autre équipement (p. ex. chaudière électrique, thermopompe géothermique) lors des périodes de pointe. Dans certains cas d'utilisation comme source principale, l'ATC est l'**unique** source de chauffage présente, alors que dans d'autres cas, il est **combiné** à un autre équipement (p. ex. chaudière électrique, chaudière au combustible) qui assure une redondance et comble ponctuellement des besoins élevés. L'utilisation comme source principale et comme gestion de pointe permettent autant l'une que l'autre de niveler et de déplacer la demande d'électricité liée au chauffage, soient deux méthodes de gestion de la demande discutées dans la revue de la littérature.

Les entrevues ont d'abord permis de catégoriser les projets incluant l'installation d'ATC selon le type de bâtiment concerné, soit les bâtiments existants, les transformations majeures (p. ex. un agrandissement) et la construction de nouveaux bâtiments. Tous les participants ont réalisé au moins un projet dans un bâtiment existant, dont la plupart pour des CSS. Ces projets consistaient à rénover la chaufferie existante afin de remplacer des équipements de chauffage en fin de vie. Quelques projets, moins nombreux, consistaient à réaliser une transformation majeure d'un bâtiment existant et à construire un nouveau bâtiment. Le participant 1 est le seul à avoir participé à la conception d'une transformation majeure, mais l'ATC a été installé dans la chaufferie qui dessert la partie existante du bâtiment et non l'agrandissement. Relativement

à l'installation de l'ATC, ce projet est donc similaire à une rénovation de chaufferie existante. Les participants 5 et 8 ont inclus des ATC dans des nouvelles constructions, représentant respectivement 75% et 50% des bâtiments pour lesquels ils ont eu une implication personnelle en conception. Ainsi, la majorité des projets couverts par les entrevues concerne des installations d'ATC dans des bâtiments existants. Ces projets visaient des objectifs similaires, catégorisés comme suit :

- retirer le mazout comme source d'énergie de chauffage;
- gérer la demande d'électricité liée au chauffage;
- réduire les coûts d'exploitation, dont le coût de l'appel maximal de puissance;
- réduire la maintenance des équipements CVCA et faciliter leur contrôle à distance.

Les motivations derrière ces objectifs sont multiples, dont : l'exigence d'exemplarité de l'État présentée dans l'introduction de ce mémoire et la nécessité de remplacer des équipements (p. ex. chaudière) approchant leur fin de vie, car exigeant de plus en plus d'interventions de maintenance. Ces projets consistaient à électrifier une part du chauffage afin de le décarboner, ce qui requiert de gérer la demande d'électricité qui y est liée. Ces objectifs sont donc conséquents avec ceux justifiant le recours à l'ATC hydronique, et plus globalement le recours au stockage thermique électrique, qui ont été présentés dans la revue de la littérature. Enfin, soulignons d'emblée que les participants travaillant pour des ESE accordent une attention particulière à l'objectif de réduction des coûts d'exploitation, puisque leurs projets reposent sur un autofinancement par des EEG.

Pour les nouveaux bâtiments, ces objectifs sont sensiblement les mêmes, à la différence près qu'il est plutôt question de minimiser le recours aux combustibles, tels que le gaz naturel et le propane, en excluant d'emblée le mazout qui n'est plus installé. L'utilisation d'ATC comme équipement de gestion de pointe en combinaison avec une thermopompe géothermique, telle qu'apparaissant dans le Tableau 3.6 (ID 8), est aussi liée à des projets réalisés dans des nouveaux bâtiments. Les objectifs visés demeurent de réduire la demande d'électricité liée au chauffage (c.-à-d. la puissance appelée de la thermopompe) et de réduire l'usage de combustibles (p. ex. gaz naturel, propane) lors des périodes de pointe.

3.3.3.1 Conception préliminaire

La conception préliminaire vise à analyser les besoins du client, à définir les objectifs et la portée du projet et à effectuer des validations préliminaires de faisabilité technique. C'est à cette étape que la décision d'installer l'ATC est prise. Dans certains cas (ID 1 et 2), cette décision est prise d'emblée, puisqu'explicitement demandée par le client, un CSS, qui avait déjà une expérience avec l'ATC dans d'autres bâtiments. Au moment de l'entrevue, c'étaient par ailleurs les seuls projets incluant un ATC que ces participants (ID 1 et 2) avaient réalisés. Dans d'autres cas (ID 4 et 5), c'est soit le client qui a demandé au concepteur d'évaluer la faisabilité et la pertinence d'installer un ATC ou bien le concepteur qui le lui a proposé. Finalement, certains cas (ID 3, 5 et 6) témoignent que la décision d'installer l'ATC a été assez facile à prendre puisque les options étaient limitées pour à la fois atteindre les objectifs visés de décarbonation et de gestion de la demande d'électricité et composer avec les contraintes de budget, d'échéancier et de portée des travaux. En effet, pour plusieurs projets réalisés dans des bâtiments de CSS, une réfection complète du réseau de distribution du chauffage n'était pas possible puisqu'excédant le budget et le temps disponibles pour réaliser les travaux et impactant le déroulement normal des activités scolaires. Ainsi, les travaux de réfection étaient principalement concentrés dans la chaufferie, tout en composant avec un réseau hydronique et des radiateurs initialement conçus pour opérer à des températures desservies par des chaudières (70-90°C environ). La décision d'installer l'ATC s'avère pratiquement nécessaire lorsqu'en plus le client ne souhaite pas utiliser du combustible comme source d'appoint de chauffage lors des périodes de pointe : « 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'exploitation viables. C'était un *no-brainer* [décision prise d'emblée] et la question était de savoir combien d'accumulateurs il fallait installer, plutôt que s'il fallait en installer. » (ID 6). L'enveloppe thermique, l'étanchéité et la masse thermique de certains bâtiments existants rendent en outre difficile de réduire la demande d'électricité liée au chauffage simplement en le délestant durant les périodes de pointe (ID 8). Dans de tels cas, les concepteurs ont eu recours à l'ATC hydronique comme une solution simple, à moindre coût, qui répond aux objectifs visés et qui respecte les contraintes imposées.

En somme, peu de défis ont dû être relevés lors de la conception préliminaire dans ce contexte où les options possibles de réfection des bâtiments existants de CSS étaient limitées et lorsque certains clients demandaient explicitement d'installer un ATC. Il apparaît donc que les pratiques actuelles conviennent. Parmi ces pratiques, les concepteurs effectuent des validations simples pour appuyer leur décision de recourir à l'ATC, notamment :

- l'appel maximal de puissance électrique est facturé mensuellement au client;
- la demande moyenne d'électricité du bâtiment varie d'au moins 50 kW entre la période occupée et inoccupée, permettant de charger l'ATC en période inoccupée;
- tant sur le plan technique que budgétaire, les entrées électriques (lorsque multiples) peuvent être combinées pour utiliser la puissance disponible en période inoccupée;
- l'espace disponible dans la chaufferie permet d'installer un ou des ATC, tout en respectant les dégagements recommandés par le fabricant;
- la capacité portante du plancher permet de supporter le poids de l'ATC;
- la ventilation de la chaufferie est adéquate pour respecter la température ambiante recommandée par le fabricant.

Ces validations permettent de confirmer rapidement la faisabilité et la pertinence d'installer l'ATC. À ce titre, certaines validations omises en début de projet ont par la suite nécessité des travaux imprévus, de nature électrique, de la part de quatre participants (ID 3, 5, 6 et 8) lors de leur premier projet. Parmi leurs leçons apprises, ils s'assurent maintenant de vérifier que la tension d'alimentation (p. ex. 600 V triphasé) et que la capacité de l'entrée électrique conviennent à l'électrification du chauffage. L'étroite collaboration des équipes de conception mécanique et électrique est donc requise dès la conception préliminaire d'un projet d'électrification du chauffage, qu'elle inclue ou non l'installation d'ATC.

Ces validations préliminaires permettent de déterminer le nombre maximal d'ATC pouvant être installé et de définir l'utilisation de l'ATC indiquée dans le Tableau 3.6 (p. ex. source principale, gestion de pointe avec chaudière électrique). Pour une utilisation comme source principale, les concepteurs estiment le nombre d'ATC requis en considérant la capacité de chauffage des équipements existants et les caractéristiques de l'enveloppe thermique du bâtiment afin d'évaluer sommairement les besoins de chauffage à combler. Les factures

d'énergie sont aussi utilisées. Cette estimation sert simplement à s'assurer que la conception préliminaire puisse être présentée au client avant de poursuivre avec la conception détaillée. Pour une utilisation comme équipement de gestion de pointe, le nombre d'ATC est principalement limité par : l'espace disponible dans la chaufferie, la puissance électrique disponible en période hors pointe et par la capacité de l'entrée électrique. L'analyse sommaire de rentabilité complète cette étape de conception préliminaire en évaluant l'impact économique lié à l'installation d'ATC.

3.3.3.2 Analyse sommaire de rentabilité

Au moment de présenter le concept préliminaire au client, l'évaluation du budget à allouer fait inévitablement partie des discussions. Ainsi, la plupart des concepteurs réalisent une analyse sommaire de rentabilité spécifique à chaque projet, autant pour les projets réalisés en mode traditionnel que les projets d'EEG. Cette analyse de rentabilité n'a pas été nécessaire pour un des deux cas (ID 2) où le client a demandé explicitement d'installer un ATC.

Plusieurs projets couverts lors des entrevues témoignent de cas où des équipements de chauffage en fin de vie devaient être remplacés, tout en conservant le réseau existant de distribution d'eau chaude et les radiateurs. Une mobilisation de fonds est donc requise d'emblée pour remplacer ces équipements et électrifier une part du chauffage, ce qui réduit le surcoût d'acquisition et d'installation de l'ATC par rapport à d'autres équipements. La rentabilité est alors facile à démontrer pour ce type de projet, d'autant plus que les options à comparer sont limitées, tel qu'exposé dans le paragraphe 3.3.3.1.

Pour d'autres types de projets, par exemple les nouvelles constructions et les transformations majeures, le budget à allouer est significativement plus élevé et le coût d'acquisition et d'installation d'ATC représente une faible proportion du budget total. Il apparaît néanmoins que les concepteurs n'arrivent pas à évaluer facilement la rentabilité d'ajouter l'ATC à ce type de projet, puisque l'incertitude sur l'impact qu'il peut avoir sur l'appel de puissance électrique du bâtiment est élevée. Pour certains projets discutés lors des entrevues, c'est ce qui a amené

des participants, qui avaient considéré l'installation d'ATC lors de la conception préliminaire, à prioriser d'autres mesures de gestion de la demande au moment d'évaluer la rentabilité. Un constat similaire est tiré à partir de discussions portant sur d'autres projets, réalisés dans des bâtiments existants, où l'utilisation d'ATC comme équipement de gestion de pointe a été ciblée lors de la conception préliminaire, mais finalement non retenue au moment d'en évaluer la rentabilité. C'est donc un défi pour les concepteurs d'avoir suffisamment de confiance envers l'impact que peut avoir l'ATC pour en justifier l'installation, comparativement à d'autres mesures moins dispendieuses dont la rentabilité a été confirmée lors de projets antérieurs. À cet effet, le participant 7 a mentionné avoir considéré l'installation d'ATC dans plusieurs projets, mais qu'au moment de prioriser les mesures en fonction de leur rentabilité, l'incertitude sur l'impact de l'ATC, en plus de son coût jugé élevé par rapport aux autres mesures, l'ont amené à proposer d'autres options au client.²¹ Étant des projets d'EEG, l'ajout de tout équipement impacte la valeur actuelle nette du projet, qui est le principal indicateur financier qu'emploie l'ESE pour formaliser son engagement à mettre en œuvre un projet qui engendre des économies. L'incertitude sur la rentabilité d'installer l'ATC, découlant de l'incertitude sur son impact sur la demande d'électricité, est donc particulièrement limitante pour les projets d'EEG où la décision d'installer l'ATC n'est pas prise d'emblée lors de la conception préliminaire. Pour les projets réalisés en mode traditionnel, la firme de génie-conseil n'a pas de tel engagement contractuel sur les économies.

Les barrières à ce défi sont multiples, allant du manque d'expériences passées et documentées sur l'impact de l'ATC, à l'incertitude sur la complexité d'opérer l'ATC pour déplacer la demande d'électricité, à des interrogations quant à la maintenance requise, spécifiquement la fréquence et le coût de remplacement des éléments chauffants. Ces exemples de barrières pourraient expliquer que plusieurs projets incluant des ATC couverts par les entrevues sont des cas où les options de réfection étaient limitées et d'autres où le client a demandé

²¹ Les autres options proposées par l'ID 7 pour la gestion de la demande d'électricité consistaient à : revoir la modulation des serpentins de chauffage et des chaudières électriques et les contrôler avec des redresseurs au silicium commandé (c.-à-d. nivelage), installer une boucle de récupération de chaleur, utiliser du combustible en appoint lors des périodes de pointe (c.-à-d. écrêtage) et évaluer la possibilité de changer de tarif d'électricité.

explicitement d'installer l'ATC. L'incertitude sur la complexité d'opérer l'ATC pour déplacer la demande d'électricité liée au chauffage est inhérente à la nature imprévisible de la demande d'électricité du bâtiment, à la capacité d'anticiper les besoins de chauffage à combler et à la robustesse des séquences de contrôle en place, qui sont tous des éléments mis de l'avant dans la revue de la littérature et communs à plusieurs systèmes de stockage thermique. Paradoxalement, l'implantation des séquences de contrôle lors de la mise en service discutée au paragraphe 3.3.1.1 démontre que l'opération de l'ATC n'est pas autant détaillée qu'elle le devrait dans les séquences, ce qui entretient une incertitude sur les conditions à mettre en place pour s'assurer que les économies et la rentabilité visées soient atteintes. Le paragraphe 3.3.3.4 traite de l'élaboration des séquences de contrôle au moment de la conception et des défis qui y sont associés.

Enfin, les pratiques actuelles indiquent que les concepteurs sont au fait des programmes de subvention offerts et les considèrent lors des analyses de rentabilité. Les subventions offertes au moment de réaliser les projets indiqués au Tableau 3.6 ne semblent toutefois pas avoir orienté le choix d'installer les ATC. Elles sont considérées comme un « bonus financier » au projet et non comme un « incitatif » à installer l'ATC. Il est à noter qu'au moment de réaliser les projets couverts par les entrevues, des programmes ciblant spécifiquement l'installation d'ATC n'étaient pas disponibles. C'étaient plutôt des programmes généraux offerts par les distributeurs d'énergie (p. ex. Énergir), par un service public d'électricité tel qu'Hydro-Québec et par le Gouvernement provincial pour encourager le retrait du mazout. Nonobstant, même un programme offrant un incitatif à l'achat d'ATC, tel que celui dorénavant offert par Hydro-Québec pour la clientèle C&I²², ne permet pas de pallier l'incertitude sur la capacité à opérer adéquatement l'ATC pour réduire l'appel de puissance liée au chauffage. Il n'adresse pas les barrières énoncées précédemment, puisque le soutien technique requis lors de la mise en service, du suivi de l'opération et du suivi de la performance pouvant pallier cette incertitude n'est pas offert par un tel programme. Ce type de programme encourage toutefois les

²² Le programme « Solutions efficaces » (version 3.1) d'Hydro-Québec offre une subvention pour l'achat d'un ATC hydronique lorsque cette mesure de gestion de la demande est combinée à une autre mesure d'efficacité énergétique liée au chauffage du bâtiment.

concepteurs à considérer plus systématiquement l'ATC dans leurs projets : « 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. » (ID 5). Les programmes de subvention offerts suscitent donc l'intérêt des concepteurs et des clients envers l'ATC lors de la conception préliminaire et de l'analyse de la rentabilité, au terme desquelles s'ensuit la conception détaillée.

3.3.3.3 Conception détaillée

La conception détaillée vise à raffiner les estimations faites durant la conception préliminaire pour confirmer, entre autres, le modèle (50 ou 80 kW_e) et le nombre d'ATC à installer, puis à produire les plans et devis. Les entrevues ont montré que pour une utilisation de l'ATC comme équipement de **gestion de pointe**, les validations simples faites lors de la conception préliminaire sont simplement révisées. Les spécifications à indiquer aux plans pour installer l'ATC (p. ex. préparation du plancher, raccordement électrique et hydronique) n'ont pas amené les concepteurs à relever de défi particulier, car son installation est comparable à celle d'autres équipements centralisés (p. ex. chaudière électrique) du point de vue de la **conception** d'une réfection ou d'une construction de chaufferie. Pour cette utilisation de l'ATC, la conception détaillée est donc effectuée rapidement.

Or, ces pratiques sont partielles, car elles ne permettent pas d'évaluer concrètement comment l'ATC contribuera à la gestion de la demande d'électricité du bâtiment. Pour la plupart des projets couverts par les entrevues (c.-à-d. des bâtiments existants), les concepteurs ne pouvaient pas faire cette évaluation puisque les seules données disponibles sur la demande d'électricité provenaient de factures mensuelles indiquant : la consommation d'énergie, l'appel maximal de puissance et le facteur d'utilisation. Ces données ne sont donc pas disponibles à une résolution temporelle suffisante (p. ex. horaire, 15 minutes) pour établir un profil adapté à du stockage avec des cycles journaliers de charge-décharge. Pour une utilisation de l'ATC comme équipement de **gestion de pointe**, les concepteurs ont pu y accorder moins d'importance, puisque l'espace disponible au sol est un des principaux facteurs qui limitent le

nombre d'ATC et les deux seuls modèles disponibles occupent la même superficie. La majorité des ATC installés pour cette utilisation étaient donc le modèle de 80 kW_e.

Pour une utilisation de l'ATC comme **source principale de chauffage**, cette lacune des données sur les bâtiments **existants** amène davantage de défis à relever. En plus d'avoir peu de données pour établir le profil de demande d'électricité, les données disponibles pour établir celui des besoins thermiques à combler sont elles aussi partielles. Ces données doivent être extraites des factures mensuelles d'électricité, qui combinent d'autres usages que le chauffage, et des factures de combustible qui sont, au mieux, elles aussi mensuelles. Même en redistribuant les consommations d'énergie mensuelles selon divers paramètres (p. ex. degrés-jours, horaire d'occupation du bâtiment), c'est un défi pour le concepteur d'évaluer la puissance thermique que l'ATC doit fournir et par conséquent, l'énergie qu'il doit avoir stockée : « Les concepteurs évoquent eux-mêmes que l'incertitude sur le profil des besoins thermiques est relativement grande. » (D'Avignon, 2022, p. 45). En plus, la capacité actuelle utilisable d'énergie stockée de l'ATC n'est pas caractérisée, ce qui ajoute à ce défi. Les recommandations tirées de guides présentées dans la sous-section 1.1.3 de la revue de la littérature ne peuvent donc pas être suivies, au risque de sous ou de surdimensionner les équipements. Pour pallier cette lacune des données sur les bâtiments existants, un concepteur (ID 2) a utilisé des historiques de données aux 15 minutes enregistrés par le BMS qui était **déjà en place** avant la réfection de la chaufferie. En analysant l'état (marche/arrêt) de la chaudière existante pendant une période froide de quelques jours consécutifs, il a pu évaluer la puissance maximale de chauffage que l'ATC doit fournir et justifier le nombre et le modèle à installer. Il est à noter que dans ce cas précis (ID 2), il aurait aussi fallu évaluer la quantité totale d'énergie à stocker afin d'établir une courbe de consigne de température des briques spécifique à ces besoins. Cela aurait allégé le rodage des séquences de contrôle suivant la mise en service discuté dans la sous-section 3.3.1.

Bien que cela n'ait pas été discuté lors des entrevues, il appert que le mesurage à une fréquence horaire ou sous-horaire, par exemple des températures et débits d'eau de chauffage et de l'appel de puissance électrique du bâtiment, soit une bonne pratique à adopter en vue de la conception

détaillée. Ce mesurage peut être fait avec l'instrumentation du réseau de chauffage et le BMS, s'ils sont déjà en place, ou bien en installant temporairement des appareils de mesure. Le gestionnaire de projets de CSS ou de la SQI doit ainsi prévoir installer ce mesurage **avant** de procéder aux appels d'offres pour la conception de la réfection de la chaufferie.

Enfin, pour les quelques projets réalisés dans de **nouveaux** bâtiments couverts par les entrevues, une modélisation de l'enveloppe du bâtiment était déjà disponible au moment d'effectuer la conception détaillée de l'installation de l'ATC. Cette modélisation est utilisée pour estimer le profil de besoins thermiques à combler par l'ATC et la puissance électrique disponible pour le charger. Ces données sont ainsi plus faciles à obtenir que celles des bâtiments existants. Il n'y a toutefois pas de modèle énergétique de l'ATC hydronique intégré dans les logiciels utilisés par l'industrie qui permettrait de tester des courbes de consigne de température des briques, en vue de les spécifier dans les séquences de contrôle à implanter. Il faudrait éventuellement qu'un tel modèle soit développé.

3.3.3.4 Séquences de contrôle

Les séquences à implanter et l'instrumentation à installer sont spécifiées dans les plans et devis. Les entrevues, ainsi que les plans et devis consultés à la suite de celles-ci, indiquent que dans la pratique actuelle, les séquences spécifiées fournissent l'information **minimale** aux entrepreneurs effectuant la mise en service : les paramètres généraux du contrôle de l'ATC et du réseau de chauffage sont indiqués, ainsi que l'instrumentation requise pour l'implantation des séquences (p. ex. mesurage de la puissance électrique appelée). Toutefois, les lacunes soulevées précédemment quant au bâtiment et à l'ATC hydronique limitent le niveau de détail qui peut être spécifié aux séquences, ce qui impacte la durée du rodage. Ces lacunes sont :

- Bâtiment : profil de besoins thermiques à combler, profil de puissance électrique;
- ATC hydronique : capacité actuelle utilisable d'énergie stockée, ambiguïté de la documentation technique sur les interactions et les priorités entre les canaux CLoc du contrôleur, méconnaissance du risque encouru en maintenant des températures élevées dans les briques.

Dans les pratiques actuelles, des paramètres essentiels pour opérer l'ATC et atteindre les bénéfices visés sont soit absents des spécifications (p. ex. puissance de délestage), ou bien spécifiés mais avec une mention « à ajuster » (p. ex. courbe de consigne de température des briques). Un concepteur (ID 5) a par exemple spécifié la même courbe de consigne de température des briques pour plusieurs bâtiments. Il a mentionné ne pas avoir pu s'y attarder davantage dans le cadre de ses mandats. Un autre (ID 2) a spécifié une consigne de températures des briques de 760°C en tout temps lorsque la température extérieure est comprise entre -25°C et +5°C, donc essentiellement tout l'hiver. Ces exemples témoignent de la partialité des séquences avec laquelle les entrepreneurs effectuant la mise en service doivent composer. Pour les projets d'EEG, le niveau de détail indiqué aux séquences peut être moins critique que pour les projets réalisés en mode traditionnel, puisque l'ESE est davantage impliquée lors de la mise en service et est responsable du suivi de performance.

Les séquences de contrôle étant une façon pour le concepteur de transmettre son intention vis-à-vis de l'opération de l'ATC aux personnes chargées de la mise en service, il apparaît être une bonne pratique que de clarifier les paramètres qui doivent être ajustés et d'indiquer ceux qui n'ont pu être définis lors de la conception. Cela permettrait de mieux guider le rodage des séquences, plutôt que de l'effectuer à tâtons comme les pratiques actuelles en témoignent dans la sous-section 3.3.1. Enfin, une autre bonne pratique serait d'exploiter les données des canaux RLoc du contrôleur de l'ATC (p. ex. nb d'éléments chauffants sous tension, consigne de vitesse du ventilateur) et de les intégrer à des séquences qui assistent les opérateurs dans le suivi de l'opération et la détection de défaillances, afin d'adresser les lacunes soulevées dans les sous-sections précédentes.

3.4 Synthèse des défis identifiés et des bonnes pratiques à adopter

Les trois sections précédentes ont présenté les principaux défis et leçons apprises associés aux pratiques actuelles de mise en œuvre d'ATC hydroniques dans des bâtiments institutionnels. Ces défis sont liés, dans une certaine mesure, aux défis présentés dans le Tableau 3.1 au début de ce chapitre qui sont tirés de la littérature sur le stockage thermique, au sens large du terme.

Les défis identifiés par l'analyse des entrevues ne peuvent tous être entièrement attribués à l'installation spécifique de l'ATC hydronique, puisqu'ils rejoignent ceux communs à plusieurs autres systèmes de stockage thermique. D'autre part, plusieurs installations ont été réalisées dans un contexte de réfection et de transition énergétique de chaufferies de bâtiments existants. Ils sont donc aussi liés, à un certain point, à ce contexte qui aurait pu amener des défis similaires à relever en installant des systèmes conventionnels de chauffage hydronique. Enfin, la collecte de données lors des entrevues a intentionnellement visé des participants ayant déjà acquis une expérience d'opération, de maintenance ou de conception avec l'ATC hydronique. Les défis à relever identifiés à partir de ces entrevues peuvent donc différer de ceux qui pourraient être identifiés en discutant avec des participants n'ayant pas encore d'expérience avec l'ATC hydronique, et appréhendant ou non, son utilisation.

Le Tableau-A VI-1 présenté à l'Annexe VI synthétise les six défis potentiels tirés de la revue de la littérature (présentés dans le Tableau 3.1) auxquels sont associés les défis à relever identifiés à partir de l'analyse des entrevues. Ce tableau montre le lien étroit entre les défis tirés de la revue de la littérature et ceux identifiés spécifiquement pour des installations passées d'ATC. Les défis no 1, 3 et 5 sont liés de près aux lacunes de la documentation technique sur l'ATC hydronique qui ont été soulevées. Réviser le contenu et assurer la clarté de la documentation aiderait inévitablement à les surmonter. Le point commun à ces six défis est que **l'expertise de mise en œuvre de systèmes de stockage thermique est actuellement limitée**. Faciliter la mise en œuvre d'ATC hydroniques passe entre autres par le développement de cette expertise et un meilleur transfert de connaissances entre les intervenants chargés de la conception, de l'opération et de la maintenance. Cela permettra d'améliorer les pratiques actuelles et d'adresser quelques-unes des barrières identifiées. À cet effet, le Tableau 3.7 à la page suivante résume les bonnes pratiques à adopter qui ont été introduites au cours des sous-sections précédentes. Ce tableau indique les phases concernées, donc par extension, à qui s'adresse chacune des bonnes pratiques. Les numéros des défis à relever indiqués correspondent à ceux utilisés dans le Tableau 3.1 au début de ce chapitre. Les recommandations pour les travaux futurs suivent quant à elles la conclusion de ce mémoire.

Tableau 3.7 Bonnes pratiques à adopter

Phases concernées	Bonnes pratiques à adopter	Défis à relever
C	Transmettre clairement l'intention derrière la conception aux personnes chargées de la mise en service et aux opérateurs via la documentation du projet, c.-à-d. l'utilisation prévue de l'ATC, les paramètres de la séquence de contrôle à ajuster au fil des saisons d'opération et ceux à ne pas modifier, ainsi que l'importance d'optimiser la séquence.	1, 5
O, M	S'assurer de ne pas maintenir les briques et les éléments chauffants à haute température (>700°C) pendant des périodes prolongées (jours consécutifs), p. ex. en considérant l'horaire d'opération du réseau de chauffage pour cibler les périodes où les besoins thermiques à combler par l'ATC sont réduits.	1
O, M	S'assurer que la décharge de l'ATC ne porte pas le moteur du ventilateur à fonctionner à basse vitesse pendant des périodes prolongées (jours consécutifs), p. ex. en limitant les moments où l'ATC doit combler un faible écart de température d'eau.	1
C	Exploiter, lorsque possible, l'historique de données d'opération enregistré via le BMS lors de la conception détaillée afin d'analyser l'opération du réseau de chauffage existant et d'évaluer avec plus de précision le profil de besoins thermiques à combler et l'énergie à stocker dans l'ATC.	2, 4
G*	Installer du mesurage sur le réseau de chauffage (p. ex. débits et températures d'eau aux 15 minutes) dès le début d'un projet de réfection du chauffage afin de mieux outiller les concepteurs.	2, 4
O	Mettre en place un système de gestion de l'énergie qui prétraite les données d'opération de l'ATC et qui produit des analyses sommaires pour évaluer en continu son impact.	4
O	Prévoir la gestion automatisée des bogues empêchant le cours normal de l'opération de l'ATC (particulièrement la charge) dans les séquences de contrôle.	5
C, M	Exploiter les données des canaux RLoc du contrôleur de l'ATC dans des séquences de détection automatisée de défaillances d'opération et de composants. Installer l'instrumentation externe nécessaire pour l'implantation de ces séquences (p. ex. mesurage de puissance électrique).	6
M	Planifier les ressources à allouer à la maintenance préventive en fonction des tâches identifiées dans la fiche synthèse.	6
*La phase G désigne « Gestion » et concerne les gestionnaires de projet, tels que ceux travaillant pour un CSS ou la SQI, qui retiennent les services professionnels et techniques pour effectuer une réfection du chauffage.		

CHAPITRE 4

PERFORMANCE ACTUELLE D'ATC OPÉRÉS DANS DES BÂTIMENTS INSTITUTIONNELS

Ce chapitre vise à quantifier la performance actuelle d'ATC hydroniques en opération dans des bâtiments institutionnels. D'après la revue de la littérature, les indicateurs de performance à quantifier sont : l'impact sur la puissance électrique appelée du bâtiment, le rendement énergétique, l'impact sur les coûts d'énergie et de puissance, ainsi que l'impact sur les émissions de GES. Des données d'opération et mesurées in situ sont utilisées pour quantifier ces indicateurs. Ce chapitre va donc circonscrire le mode de contrôle et l'utilisation de l'ATC, en plus de quantifier les indicateurs de performance qui y sont étroitement liés.

La méthodologie, les résultats et les analyses présentés dans les sections 4.1 à 4.3 de ce chapitre portent sur un site en particulier, le site #10. Les résultats de ce site ont été publiés dans le Rapport technique dans une forme abrégée et conjointe avec les résultats d'autres sites. Le traitement et l'analyse des données de ce site sont le travail original de l'auteur de ce mémoire.

Dans la quatrième et dernière section de ce chapitre, les résultats d'autres sites tirés du Rapport technique sont présentés en vue de : mettre en perspective les résultats de la performance actuelle des ATC du site #10 et dégager des constats généraux sur la performance actuelle des ATC dans les bâtiments de CSS. Ces résultats permettront ainsi de couvrir un plus grand nombre d'ATC et de conditions d'opération. Tel que mentionné dans le Chapitre 2, les résultats de ces autres sites sont issus des travaux de collègues du groupe de recherche. Leurs rapports individuels de projet sont cités lorsqu'un résultat ou un constat spécifique en est tiré et n'apparaît pas dans le Rapport technique. La synthèse des constats généraux sur la performance actuelle et des actions spécifiques recommandées, n'apparaissent pas dans les rapports de projet des collègues. C'est donc une contribution originale de ce mémoire. La numérotation des sites utilisée dans ce mémoire est la même que celle utilisée dans le Rapport technique.

4.1 Description du site étudié

Le site étudié (#10) occupe une superficie de 34 262 m² qui héberge une école secondaire, un centre de formation professionnelle, un centre d'études collégiales, des installations sportives et une salle de spectacle, qui sont tous adjacents et constituent un même bâtiment. Un réseau centralisé de chauffage hydronique dessert ces espaces. La Figure 4.1 montre la configuration du réseau et les usages desservis, soit des radiateurs à eau chaude pour le chauffage périphérique des espaces désignés par « Rad », des serpentins de préchauffage de l'air extérieur et de chauffage de l'air recirculé désignés par « OA » et des échangeurs de chaleur dédiés au chauffage de l'eau chaude domestique désignés par « ECD ». Ce réseau dessert également le chauffage d'une piscine dans le bâtiment qui est désigné par « Autre » sur la Figure 4.1. Les usages Rad et OA sont desservis durant la saison de chauffage uniquement, alors que les usages ECD et Autre sont desservis toute l'année. Ainsi, le réseau est en opération toute l'année. La température d'alimentation d'eau chaude (c.-à-d. au point avant les « Usages » sur la Figure 4.1) se situe entre 70°C à 85°C et est modulée en fonction des besoins de chauffage. Ce réseau est donc de « basse température », tel que défini par ASHRAE (2020a).

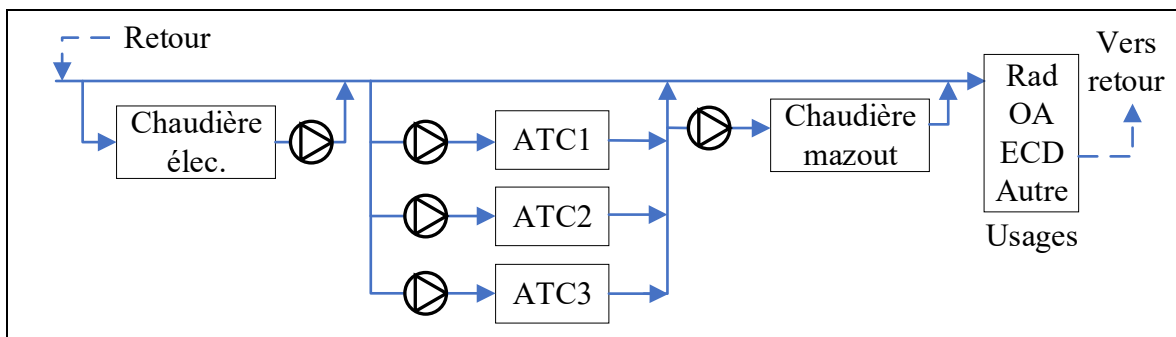


Figure 4.1 Configuration du réseau de chauffage hydronique du site #10

La Figure 4.1 montre que les trois ATC sont raccordés en parallèle les uns des autres et en série avec une chaudière électrique et une chaudière au mazout. La puissance électrique nominale de chaque ATC est de 80 kW (modèle de 80 kW_e) et celle de la chaudière électrique est de 1 350 kW. La chaudière au mazout a une puissance nominale de chauffage de 5 099 MBH (1 484 kW_{éq}). Celle-ci était déjà présente au moment d'installer les ATC et a été conservée.

Les ATC ont été installés en 2016 à la suite du démantèlement d'une autre chaudière au mazout. À ce moment, le réseau de chauffage était déjà partiellement électrifié, car la chaudière électrique a été installée en 2015. Ce site comprend un seul compteur d'électricité abonné au tarif M d'Hydro-Québec. Les factures énergétiques, extraites via le portail de suivi des dépenses énergétiques Hélios²³ pour la période de janvier 2017 à décembre 2020, indiquent que la consommation moyenne d'électricité est de 5 343 GWh/an et la consommation moyenne de mazout est de 2 132 GJ/an (592 GWh_{éq}/an). La consommation totale annuelle de combustible représente ainsi moins de 15% de la consommation totale annuelle d'énergie, toutes sources confondues.²⁴ Ce site respecte donc le critère d'exemplarité de l'État tel que défini dans les modalités d'application en vigueur au moment d'installer les ATC (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016). Entre 2017 et 2020, l'appel maximal annuel de puissance électrique s'est produit au cours du mois de janvier ou de février et varie entre 1 135 kW et 1 190 kW.

4.2 Méthode d'analyse de données d'opération et d'évaluation de la performance

Les données d'opération du site étudié (#10) sont comprises entre le 2 décembre 2020 et le 7 mai 2021. Dans ce mémoire, les données comprises entre le 2 décembre et le 31 mars sont dénommées « période d'hiver », définition similaire à celle qu'Hydro-Québec emploie pour établir la puissance minimale facturée au tarif M.²⁵ La « période d'analyse » désigne quant à elle l'entièreté des données d'opération disponibles entre décembre et mai.

La méthode d'analyse des données d'opération et d'évaluation de la performance comprend les étapes suivantes :

1. Identifier, nettoyer et prétraiter les données d'opération,
2. Établir le mode de contrôle et l'utilisation des ATC,

²³ Hélios est un outil de suivi des dépenses et de la consommation énergétiques des bâtiments utilisé par les CSS.

²⁴ La consommation de diesel pour les systèmes d'urgence n'a pas été comptabilisée, puisqu'elle a lieu à des moments ponctuels et qu'elle est marginale par rapport à la consommation totale annuelle de combustible.

²⁵ On ne tient pas compte du fait que les données d'opération du 1^{er} décembre 2020 ne sont pas disponibles, même si cette journée est comprise dans la période d'hiver telle que définie par Hydro-Québec.

3. Quantifier la performance énergétique des ATC,
4. Établir un scénario de substitution.

Les sous-sections qui suivent détaillent la méthodologie de chacune de ces étapes.

4.2.1 Étape 1 : Identifier, nettoyer et prétraiter les données d'opération

Le Tableau 4.1 décrit les données d'opération disponibles pour le site #10 et présente les symboles utilisés. Le pas de temps des données d'opération est de 15 minutes. Les colonnes « Type de donnée » spécifient la nature de la donnée, soit une valeur mesurée et enregistrée à un instant donné (Mes. Inst.), une valeur mesurée et moyennée sur le pas de temps (Mes. Moy.) ou une consigne à un instant donné (Cons. Inst.). Le type « Autre » est utilisé pour les données qui n'entrent pas dans ces catégories. Les estampilles temporelles donnant la date et l'heure d'enregistrement par le système d'acquisition sont catégorisées par « Autre ». Le Tableau 4.1 spécifie si une incertitude est considérée sur chacune des données. L'Annexe VII présente les valeurs de ces incertitudes. Aucune incertitude n'est considérée pour les consignes (Cons. Inst.). Pour certaines données de type Mes. Inst., Mes. Moy. et Autre, il n'a pas été possible d'évaluer l'incertitude. La dernière colonne du tableau indique la source des données. Elles proviennent de deux sources, soit du BMS et d'Hydro-Québec (HQ). Les données de puissance électrique appelée sur le compteur proviennent d'Hydro-Québec et toutes les autres proviennent du BMS. La source dénommée par « BMS(ATC) » indique que certaines données sont extraites du BMS, mais que c'est le contrôleur de l'ATC qui en fait l'acquisition et qui les transmet ensuite au BMS.

Tableau 4.1 Identification des données d'opération disponibles

Description	Symbole	Type de donnée				Unités	Incertitude considérée	Source de la donnée
		Mes. Inst.	Mes. Moy.	Cons. Inst.	Autre			
Température à l'entrée des ATC	$T_{in,ATC}$	X				°C	Oui	BMS
Température à la sortie de ch. ATC	$T_{out,ATCn}$	X				°C	Oui	BMS
	$T_{out,éch}$	X				°C	Oui	BMS(ATC)
	$T_{out,cons}$			X		°C	Non	BMS
Température de ch. noyau de briques de ch. ATC	$T_{briques,1}$	X				°C	Oui	BMS(ATC)
	$T_{briques,2}$	X				°C	Oui	BMS(ATC)
	$T_{briques,3}$	X				°C	Oui	BMS(ATC)
	$T_{briques,cons}$			X		°C	Non	BMS
Température extérieure actuelle	T_{ext}	X				°C	Non	BMS
Puissance électrique appelée du bâtiment	$P_{élec,bât}$		X			kW	Non	HQ
Puissance de délestage du bâtiment	$P_{délestage,bât}$			X		kW	Non	BMS
Modulation de puissance pour la charge de l'ATC	MOD			X		%	Oui	BMS
Autorisation de charge de l'ATC	$AutCh$			X		s. o.	Non	BMS
Autorisation de décharge de l'ATC	$AutDéch$			X		s. o.	Non	BMS
Vitesse commandée au moteur du ventilateur de l'ATC	v_{vent}			X		%	Non	BMS(ATC)
Débit volumique de mazout consommé	\dot{V}_{comb}	X				Gal _{us} /h	Non	BMS
Temps : Date et heure	t				X	s. o.	Non	BMS, HQ

Les croix rouges sur la Figure 4.2 indiquent la position des sondes de température installées sur la tuyauterie du réseau de chauffage hydronique dont les symboles correspondent à ceux indiqués dans le Tableau 4.1. On remarque que la température de l'eau est mesurée à la sortie de chaque ATC et qu'il n'y a qu'un point de mesure de la température de l'eau à l'entrée des ATC. En supposant que les pertes thermiques de la tuyauterie alimentant chaque ATC sont similaires, la température de l'eau à l'entrée de chaque ATC est la même.

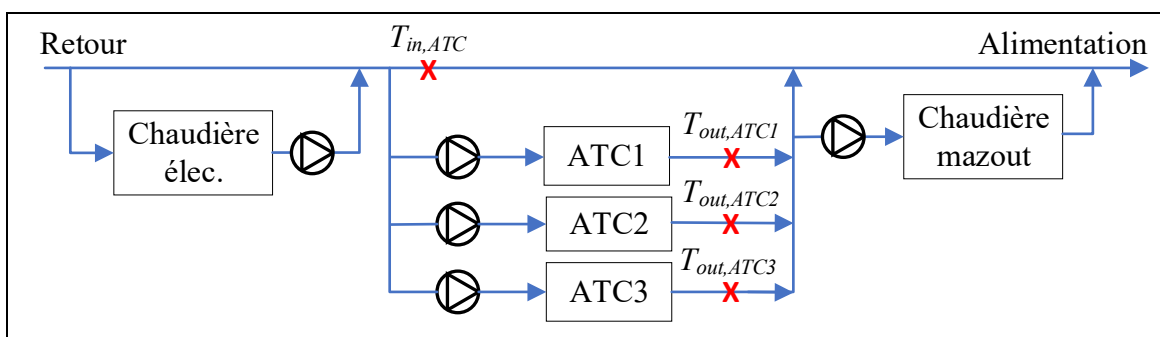


Figure 4.2 Position des sondes de température du réseau de chauffage du site #10

Les fichiers de données brutes d'Hydro-Québec sont des tableaux Excel®. Ils n'ont pas nécessité un nettoyage et un prétraitement particuliers. Les fichiers de données brutes provenant du BMS sont des fichiers de format texte. Le nettoyage de ces fichiers consiste à supprimer les doublons, à s'assurer que le pas de temps entre chaque entrée est de 15 minutes²⁶, à repérer les valeurs aberrantes et manquantes. Le Tableau 4.2 indique l'étendue attendue de chaque donnée qui est utilisée pour détecter les valeurs aberrantes. On dénombre les valeurs aberrantes parmi les données de la période d'analyse afin de juger de la qualité des données brutes. On s'attend à ce que le nombre de valeurs aberrantes soit faible. Le paragraphe 4.2.1.1 qui suit explique comment les données manquantes sont traitées et on utilise la même méthode pour traiter les valeurs aberrantes.

²⁶ Une exception est faite pour l'empile temporelle du 14 mars 2021 2 :00 (UTC-5) et celle du 14 mars 3 :00 (UTC-4) qui correspondent au changement d'heure à l'heure avancée, donc le pas de temps est nul.

Tableau 4.2 Étendues attendues des données

Symbole	Étendue attendue	Unités
$T_{in,ATC}$	25-90	°C
$T_{out,ATCn}$	25-90	°C
$T_{out,éch}$	25-90	°C
$T_{out,cons}$	60-90	°C
$T_{briques,1}$	25-850	°C
$T_{briques,2}$	25-850	°C
$T_{briques,3}$	25-850	°C
$T_{briques,cons}$	93-826	°C
T_{ext}	-30 à 30	°C
MOD	0 à 100	%
$AutCh$	0 ou 1	s. o.
$AutDéch$	0 ou 1	s. o.
v_{Vent}	0 à 100	%

4.2.1.1 Données manquantes

Le traitement des données d'opération manquantes dépend de deux facteurs : la durée pendant laquelle les données manquent et le type de donnée indiqué dans le Tableau 4.1. On fixe un seuil d'une heure et demie (1h30), ce qui correspond à cinq (5) estampilles temporelles consécutives, pour les données manquantes. Lorsque des données consécutives manquent pendant une durée inférieure ou égale à une 1h30, on applique le traitement suivant :

- Donnée de type « Consigne » : La valeur à l'estampille temporelle qui précède la valeur manquante est maintenue;
- Donnée de type « Mesurée » : Les valeurs manquantes sont calculées par interpolation linéaire en utilisant la valeur disponible à l'estampille temporelle qui précède et celle qui suit les valeurs manquantes. Les valeurs calculées sont arrondies au même nombre de décimales que les valeurs disponibles.

On fait une exception au premier point de la liste ci-haut spécifiquement pour la **consigne** de modulation de puissance pour la charge de l'ATC (*MOD*). Les données manquantes de *MOD* sont exceptionnellement traitées de la même manière que les données **mesurées** manquantes. Les caractéristiques distinguant cette consigne *MOD* des autres sont qu'elle ne prend pas des valeurs binaires, contrairement à l'autorisation de charge (*AutCh*) par exemple, et qu'elle intervient directement dans le calcul d'un indicateur de performance, puisque requise pour quantifier la puissance électrique appelée par l'ATC.

Si des données **mesurées** manquent pendant une durée excédant le seuil d'une heure et demie, soit six estampilles temporelles et plus, on utilise une méthode alternative de calcul qui est spécifique à chaque donnée. Cette méthode utilise d'autres données d'opération pour estimer les valeurs manquantes. Dans un tel cas, on ne fait donc pas d'interpolation linéaire. C'est le cas de la température mesurée à la sortie de l'échangeur de chaleur de l'ATC ($T_{out,éch}$) décrite dans le Tableau 4.1 et dont l'emplacement est illustré sur la Figure 1.7. Pour estimer les valeurs manquantes de $T_{out,éch}$, on utilise les données mesurées par la sonde de température $T_{out,ATCn}$ et l'écart moyen entre les valeurs lues par cette sonde et $T_{out,éch}$. L'équation (4.1) décrit cette procédure. L'indice i fait référence aux estampilles temporelles de la période d'analyse pendant lesquelles les valeurs de la variable $T_{out,éch}$ sont manquantes (identifiées avec « ' »). L'indice j fait quant à lui référence aux estampilles temporelles pendant lesquelles les données de $T_{out,ATCn}$ et de $T_{out,éch}$ sont disponibles, totalisant N valeurs. Cette équation est appliquée uniquement lorsque l'ATC est en décharge. Les écarts moyens de température entre les sondes $T_{out,éch,j}$ et $T_{out,ATCn,j}$ sont de 3,6°C, 3,2°C et 2,0°C respectivement pour l'ATC1, l'ATC2 et l'ATC3.

$$T'_{out,éch,i} = T_{out,ATCn,i} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{out,éch,j} - T_{out,ATCn,j}) \quad (4.1)$$

S'il n'est pas possible d'utiliser une autre variable pour estimer les données mesurées manquantes, alors on considère les données comme étant manquantes et on fait abstraction de cette période dans l'analyse. C'est le cas des variables $T_{briques,1}$, $T_{briques,2}$, et $T_{briques,3}$ pour l'ATC2 et 3 entre le 22 décembre 2020 et le 7 janvier 2021, dont les valeurs sont de 0°C. Elles

sont jugées aberrantes puisqu'elles sont hors de l'étendue attendue indiquée au Tableau 4.2. Il n'y a pas d'autre variable qui permettrait d'estimer les valeurs manquantes de températures de briques. On ne considère donc pas cette période de 17 jours dans l'analyse des données de l'ATC2 et l'ATC3. Comme ce sera expliqué dans les prochaines étapes, ces températures sont requises pour évaluer la quantité d'énergie stockée dans l'ATC et confirmer s'il y a eu charge ou décharge. Bien que cela ne s'applique pas aux données du site #10, le même raisonnement serait utilisé si des données de type consigne manquaient pendant une période excédant 1h30.

4.2.1.2 Données non disponibles

Certaines données sont requises pour quantifier la puissance thermique fournie et la puissance électrique appelée par l'ATC, mais ne sont pas disponibles parmi les données d'opération aux 15 minutes présentées dans le Tableau 4.1. Ces données sont :

- le nombre d'éléments chauffants mis sous tension par le contrôleur de l'ATC;
- l'état (marche/arrêt) et le débit de la pompe dédiée à chaque ATC.

L'étape 2 qui suit adressera le premier point. L'étape 3 (paragraphe 4.2.3.1) présentera la méthode de mesure de débit d'eau pour pallier les données non disponibles du second point.

4.2.2 Étape 2 : Établir le mode de contrôle et l'utilisation des ATC

Cette étape consiste en une analyse préliminaire des données d'opération afin d'identifier le mode de contrôle des ATC et l'utilisation qui en est faite; les indicateurs de performance qui seront détaillés aux étapes subséquentes y étant étroitement liés. Dans un premier temps, on extrait les valeurs des canaux de configuration CLoc des contrôleurs des ATC qui sont communiqués au BMS par le protocole BACnet™. Ces valeurs sont extraites en passant par le BMS. Certaines valeurs de canaux CLoc sont également relevées sur les panneaux d'affichage des ATC lors d'une visite, qui a été effectuée à un moment différent de l'extraction à partir du BMS. On s'assure que les valeurs prises sur place concordent avec les valeurs extraites du BMS, donc qu'il n'y a pas eu de changement apporté aux canaux entre ces deux lectures ponctuelles.

L'interprétation des valeurs des canaux CLoc permet de clarifier le mode de contrôle des ATC, entre autres caractérisé par :

- la modulation de puissance des éléments chauffants qui peut être effectuée sans panneau de relais SSR, ou avec un panneau et un signal 4-20 mA, BACnet™ ou autre;
- les températures maximales autorisées de l'eau en sortie de l'ATC et des briques;
- la consigne de température des briques.

Dans un second temps, une analyse sommaire des données d'opération permet de confirmer que ce mode attendu de contrôle est effectivement soutenu par les données mesurées (types Mes. Inst. et Mes. Moy.). Cette analyse consiste à tracer les données et la consigne en fonction du temps, puis à évaluer visuellement si les données tendent vers la consigne et si la consigne est atteinte à certains moments. Les quatre graphiques suivants servent à faire cette analyse :

1. La consigne de température des briques et la température extérieure actuelle mesurée,
2. La consigne de température des briques et la moyenne des températures mesurées dans chaque noyau de briques,
3. La consigne de puissance de délestage et la puissance électrique appelée du bâtiment,
4. La consigne et la mesure de la température de l'eau à la sortie de l'ATC.

Dans un troisième temps, on vérifie la cohérence des données mesurées entre elles et par rapport à l'état de l'ATC, soit la charge, la décharge ou l'attente. On n'analyse pas l'état de charge et de décharge simultanées. On produit deux graphiques, avec le temps en abscisse et les variables mentionnées ci-dessous en ordonnée, afin de répondre aux questions énoncées :

1. La température de chaque noyau de briques, l'autorisation de charge et de décharge :
À certains moments, est-ce que la température des briques augmente lorsque la charge est autorisée? Est-ce qu'elle diminue lorsque la décharge est autorisée?;
2. La température de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'ATC, l'autorisation de décharge et la vitesse commandée au moteur du ventilateur : Est-ce que l'écart entre la température de l'eau à la sortie et à l'entrée de l'ATC est positif (>0) lorsque la décharge est autorisée et que la vitesse commandée au moteur du ventilateur est non nulle?

Dans un dernier temps, on produit trois graphiques, avec les variables indiquées ci-dessous en ordonnée et le temps en abscisse, afin de répondre aux questions énoncées. On dégage de cette série de graphiques des tendances sur l'opération du bâtiment, tant au niveau du réseau de chauffage que de la puissance électrique appelée.

1. La puissance électrique appelée du bâtiment : Est-ce que le profil de puissance électrique appelée est similaire d'un jour à l'autre? Est-ce qu'il varie de manière importante au cours d'une journée donnée?;
2. L'autorisation de charge et de décharge des ATC : Quelle semble être l'utilisation préconisée des ATC? Sont-ils utilisés comme équipement de gestion de pointe ou comme source principale de chauffage? À combien de cycles quotidiens de charge et de décharge sont-ils soumis? Y a-t-il des moments où les ATC ont à la fois l'autorisation de se charger et de se décharger?;
3. La consommation de mazout et l'autorisation de décharge des ATC : Est-ce qu'une source auxiliaire de chauffage est utilisée de manière plus ou moins importante en période de pointe de demande électrique?

Ces trois séries de graphiques et les réponses aux questions qui y sont associées constituent l'analyse préliminaire des données d'opération de laquelle on dégage le mode de contrôle et l'utilisation des ATC. L'étape 3 qui suit porte sur l'analyse détaillée des données d'opération visant à quantifier les indicateurs de performance énergétique des ATC.

4.2.3 Étape 3 : Quantifier la performance énergétique des ATC

Cette sous-section présente la méthode employée pour quantifier un des indicateurs de performance, le rendement énergétique de l'ATC. Pour y parvenir, les paramètres qui suivent doivent être quantifiés pour chacun des ATC, soit : le débit d'eau, la puissance et l'énergie thermiques fournies, la puissance appelée et l'énergie électrique consommée et les pertes thermiques. Ces paramètres seront réutilisés à l'étape 4 afin de quantifier les autres indicateurs de performance. L'Annexe VII présente la méthode de calcul de l'incertitude de chacun de ces

paramètres et indicateurs. Enfin, le paragraphe 4.2.3.5 porte sur la calibration par bilan énergétique qui sert à s'assurer que le principe de conservation de l'énergie est respecté.

4.2.3.1 Mesures de débit volumique

Le débit volumique de l'eau circulant dans l'échangeur de chaleur est un paramètre nécessaire pour calculer la puissance thermique fournie par l'ATC. Or, le débit n'est pas une donnée d'opération disponible, tel que mentionné à l'étape 1. Les plans mécaniques et l'interface du BMS du site #10 indiquent que le contrôle des pompes des ATC est du type tout ou rien : elles sont soit en marche, soit à l'arrêt, sans modulation intermédiaire. Leurs débits sont donc constants, ce qui est généralement le cas de la pompe de l'ATC tel que mentionné dans la section 1.2. C'est plutôt la vitesse du moteur du ventilateur qui est modulée pour varier la puissance thermique fournie. Ainsi, on s'attend à ce que les débits d'eau soient relativement stables autour de leurs valeurs moyennes. La valeur de 1,70 L/s, indiquée aux plans, est attendue pour chaque ATC, mais il n'a pas été possible d'obtenir un rapport de balancement attestant les valeurs mesurées lors de la mise en service. Les débits circulant dans les échangeurs des ATC sont donc mesurés sur place pendant la période d'analyse. Ces mesures permettent aussi de confirmer qu'il n'y a pas de variations significatives de débit au cours d'une journée typique, c'est-à-dire lorsque le réseau de chauffage hydronique fonctionne selon le mode normal d'opération et que le bâtiment est occupé.

Les mesures de débit doivent être non-invasives et sans impact sur l'opération du chauffage. Il faut donc que le débitmètre soit installé à l'extérieur de la tuyauterie et n'exige pas d'interrompre le chauffage. Pour ce faire, on utilise un débitmètre à ultrasons à temps de transit. Pour le site #10, qui comprend trois ATC, deux débitmètres portables Dynasonics DXN (dénommés DXN par la suite) et un débitmètre Endress and Hauser Proline Prosonic Flow 91 HART (dénommé PPF91H par la suite) sont utilisés. Le Tableau 4.3 indique les sondes et le système d'acquisition utilisés pour les deux modèles de débitmètres. L'agent couplant permettant la transmission des ultrasons entre la sonde émettrice et réceptrice est le Echo 8 ZH d'Echo Ultrasonics. La caractéristique principale de cet agent couplant est qu'il est à base de

silicium, donc moins sensible à l'évaporation qu'un agent à base d'eau. Des essais préliminaires réalisés sur un tuyau d'eau chaude en acier avec un agent couplant à base d'eau ont été peu concluants, puisqu'il s'évaporait après quelques heures seulement (1-2 h), ce qui n'est pas adapté aux durées totales de mesures de 24 à 72 h indiquées dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Instrumentation utilisée pour les mesures de débit volumique d'eau

Débitmètre	Sondes	Agent couplant	Système d'acquisition	Intervalle de mesure	Durée totale des mesures
DXN	DTTSU	Echo 8 ZH	Système intégré au débitmètre	5 min	24 h
PPF91H	Prosonic Flow W	Echo 8 ZH	HOBO U12-006	1 min	72 h

La Figure 4.3 montre les emplacements sur le réseau hydronique où les sondes des débitmètres ont été installées. Le débit est mesuré à la sortie de l'ATC2 et à la sortie de l'ATC3, mais les longueurs droites de tuyauterie disponibles à l'entrée et à la sortie de l'ATC1 (voir la Figure 1.8) ne permettaient pas une mesure directe du débit circulant dans son échangeur de chaleur. Ainsi, la troisième mesure de débit est prise en amont des trois ATC, comme montré sur la Figure 4.3. Cette mesure correspond au débit total d'eau qui alimente les trois ATC.

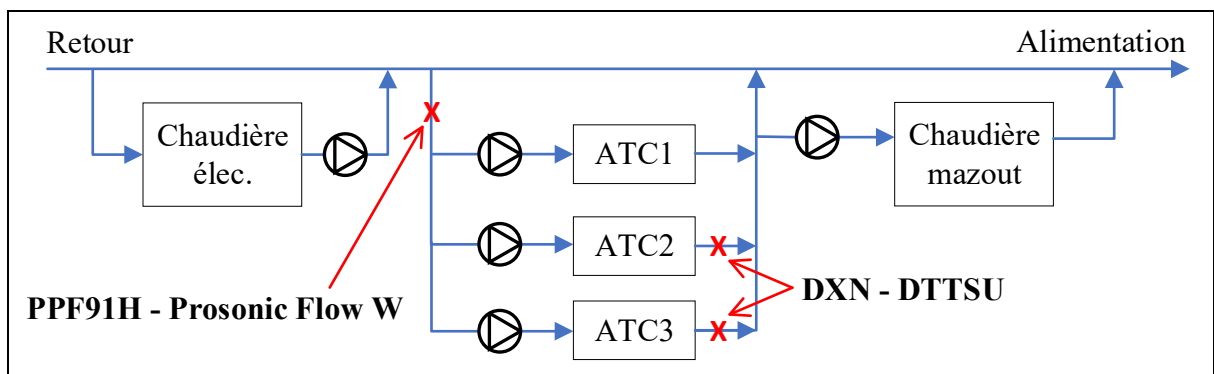


Figure 4.3 Position des sondes des débitmètres sur le réseau hydronique du site #10

On effectue l'acquisition avec les débitmètres selon les intervalles de mesure et les durées indiqués dans le Tableau 4.3. On calcule la moyenne et l'écart-type des mesures. On calcule ensuite le débit volumique moyen (\bar{V}_{ATC1}) circulant dans l'échangeur de chaleur de l'ATC1 par un bilan de masse décrit par l'équation (4.2). Ce bilan utilise les valeurs moyennes de débit

et suppose que la densité de l'eau est la même aux trois points de mesures. On considère que le débit volumique a été relativement constant pendant la période de mesures si l'écart-type est du même ordre de grandeur que l'incertitude, évaluée entre 1 et 5% de la valeur lue comme retrouvée dans la littérature présentée à la sous-section 1.3.1.

$$\bar{V}_{ATC1} = \bar{V}_{Total\ ATC} - \bar{V}_{ATC2} - \bar{V}_{ATC3} \quad (4.2)$$

Comme les mesures de débit sont prises durant la période d'analyse, elles sont comparées aux données d'opération, aux estampilles temporelles correspondantes, afin de vérifier que la consigne d'autorisation de décharge et la consigne de vitesse du moteur du ventilateur concordent avec une augmentation du débit d'eau et l'activation de la pompe. Cette vérification permet de pallier les données d'opération non disponibles sur l'état et le débit de la pompe de chaque ATC mentionnées dans le paragraphe 4.2.1.2. Elle permet de confirmer que la pompe est activée, donc le débit d'eau est non nul, lorsque l'ATC a l'autorisation de se décharger.

4.2.3.2 Puissance et énergie thermique fournies

La puissance thermique fournie par l'ATC à chaque pas de temps ($\dot{Q}_{Déch,i}$) est calculée par le bilan d'énergie entre l'eau sortante et entrante de l'échangeur de chaleur. L'équation (4.3) exprime ce bilan qui est non nul lorsque l'ATC a l'autorisation de se décharger ($AutDéch_i = 1$) et que la vitesse commandée au moteur du ventilateur est non nulle ($v_{vent,i} > 0$).

$$\begin{aligned} \text{Si } AutDéch_i = 1 \text{ et } v_{vent,i} > 0 : \dot{Q}_{Déch,i} &= \bar{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T_{eau,i} \\ \text{Sinon : } \dot{Q}_{Déch,i} &= 0 \\ \text{Où } \Delta T_{eau,i} &= T_{out,éch,i} - T_{in,ATC,i} = RLoc114_i - CLoc014 - T_{in,ATC,i} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dans l'équation (4.3), le débit volumique moyen d'eau (\bar{V}) est constant et correspond à la valeur moyenne calculée pour chaque ATC. Lorsque l'ATC n'a pas l'autorisation de se décharger, la pompe est à l'arrêt et le débit d'eau est nul. La puissance thermique fournie est

alors nulle. La densité (ρ) et la capacité thermique (C_p) de l'eau sont considérées constantes à tous les pas de temps et valent respectivement 0,975 kg/L et 4,1934 kJ/kg·K. Ces valeurs correspondent aux propriétés de l'eau à 75°C, soit la température moyenne entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur pendant la décharge. La différence de température de l'eau entre la sortie ($T_{out,éch,i}$) et l'entrée ($T_{in,ATC,i}$) de l'échangeur de chaleur à chaque pas de temps est représentée par le symbole $\Delta T_{eau,i}$. Cette différence tient compte de la valeur du canal *CLoc014* qui calibre la température affichée par le contrôleur de l'ATC au canal *RLoc114i*.

L'énergie thermique fournie par l'ATC pendant la période d'hiver ($Q_{Déch,hiver}$) correspond à l'intégrale de la puissance thermique fournie en fonction du temps, tel que décrit par l'équation (4.4). La puissance thermique fournie calculée avec l'équation (4.3) est une fonction discrète avec un pas de temps Δt de 15 minutes qui totalise N valeurs. L'équation (4.4) considère que la puissance thermique fournie est constante durant toute la durée du pas de temps.

$$Q_{Déch,hiver} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{Déch,i} \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

4.2.3.3 Puissance appelée et énergie électrique consommée

Les données d'opération permettent d'estimer la puissance électrique appelée par l'ATC à chaque pas de temps ($P_{Ch,i}$). L'équation (4.5) s'applique au mode de contrôle des ATC du site #10 qui a été identifié à l'étape 2 de la méthodologie (sous-section 4.2.2). La puissance électrique nominale des éléments chauffants contenus dans un noyau de briques (P_{Noyau}) vaut 26,7 kW soit un tiers de la puissance nominale de l'ATC de 80 kW (voir Tableau 1.2).

$$P_{Ch,i} = AutCh_i \cdot (Nb\ Noyaux\ Ch)_i \cdot MOD_i \cdot P_{Noyau} \quad (4.5)$$

L'équation (4.6) détermine le nombre de noyaux de briques dont les éléments chauffants sont sous tension ($(Nb\ Noyaux\ Ch)_i$). L'équation (4.7) indique la relation entre les valeurs de trois canaux de configuration obtenues à l'étape 2 (*CLoc015*, *CLoc040* et *CLoc041*) qui fixent la

valeur de la consigne de température des briques dans le contrôleur de l'ATC, soit $T_{briques,cons,int}$, où l'indice *int* signifie « interne au contrôleur ». ²⁷ Tel que l'indique l'équation (4.6), lorsque la température mesurée d'un noyau n ($T_{briques,i,n}$) est inférieure à cette consigne, la charge de ce noyau est autorisée par le contrôleur de l'ATC. Dans le cas contraire, la charge de ce noyau n'est pas autorisée, et ce, peu importe les consignes d'autorisation de charge ($AutCh_i$) et de modulation de puissance électrique (MOD_i) envoyées au contrôleur de l'ATC.

$$(Nb\ Noyaux\ Ch)_i = \sum_{n=1}^3 si(T_{briques,i,n} < T_{briques,cons,int}; 1; 0) \quad (4.6)$$

$$T_{briques,cons,int} = CLoc015 \cdot (CLoc040 - CLoc041) + CLoc041 \quad (4.7)$$

De manière analogue à l'énergie thermique fournie, l'énergie électrique consommée pour la charge de l'ATC ($E_{Ch,hiver}$) est calculée avec l'équation (4.8) qui exprime l'intégrale de la puissance électrique instantanée ($P_{Ch,i}$) des N pas de temps Δt de la période d'hiver.

$$E_{Ch,hiver} = \sum_{i=1}^N P_{Ch,i} \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

4.2.3.4 Pertes thermiques

Le calcul des pertes thermiques est basé sur la méthode *Lumped Capacitance* introduite dans la revue de la littérature. Cette méthode réduit un assemblage complexe à une masse thermique équivalente dont la température est supposée homogène. Dans le cas d'un ATC, on considère que cette masse thermique équivalente est la masse de briques à une température homogène

²⁷ Les canaux *CLoc015*, *CLoc040* et *CLoc041* définissent respectivement le niveau de charge ciblé par le contrôleur de l'ATC, la température maximale autorisée des briques et la température minimale autorisée (Steffes Corporation, s.d.a). Un niveau de charge ciblé (*CLoc015*) de 100% vise à ce que chacun des noyaux de briques atteigne une température égale à la valeur du canal *CLoc040*.

correspondant à la température moyenne des trois noyaux de briques. L'énergie thermique stockée dans d'autres composants, par exemple l'air à l'intérieur de l'ATC et les couches isolantes, est négligée.

L'équation (4.9) exprime l'évolution de la température moyenne des briques en fonction du temps prédite par la méthode *Lumped Capacitance*. La température de chaque noyau n de briques ($T_{briques,n,i}$) est extraite des données d'opération et on calcule la température moyenne des trois noyaux à chaque pas de temps ($\bar{T}_{briques,i}$). On applique l'équation (4.9) aux séries de données d'opération qui correspondent à des périodes d'attente. La variable $\bar{T}_{briques,t=0}$ est la température moyenne des briques au début de la période d'attente et T_{amb} est la température ambiante à l'endroit où se trouve l'ATC et est admise constante à 23°C. Cette température de 23°C correspond au point de consigne à partir duquel le système d'évacuation d'air dans la salle mécanique est activé. La constante de temps (τ) est une caractéristique de l'ATC qui exprime, de manière simplifiée, l'effet du coefficient de déperditions thermiques effectif ($(UA)_{effectif}$) et du produit de la masse et de la capacité thermique des briques ($(MC_p)_{briques}$) sur l'évolution temporelle de la température moyenne des briques.

$$\frac{\bar{T}_{briques,i} - T_{amb}}{\bar{T}_{briques,t=0} - T_{amb}} = e^{-\frac{(UA)_{effectif}}{(MC_p)_{briques}} t} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.9)$$

Adaptée de Bergman et al. (2011, p. 282)

En réécrivant l'équation (4.9) sous forme linéaire, on obtient l'équation (4.10) dont la pente de la droite est l'inverse de la constante de temps τ et dont l'ordonnée à l'origine est nulle. Pour chaque période d'attente, le terme de gauche de l'équation (4.10) est tracé en fonction du temps (t). Une régression linéaire passant par l'origine permet d'identifier la constante de temps qui concorde le mieux à chaque série de données expérimentales.

$$\ln\left(\frac{\bar{T}_{briques} - T_{amb}}{\bar{T}_{briques,t=0} - T_{amb}}\right) = -\frac{1}{\tau} t \quad (4.10)$$

Les indicateurs statistiques NMBE et CV(RMSE) définis dans la revue de la littérature et les critères énumérés ci-dessous permettent de juger de la qualité des régressions linéaires :

1. Le nombre de points (N) de la régression linéaire est supérieur ou égal à 10, ce qui correspond à une période d'attente d'une durée minimale de 150 minutes (2,5 h);
2. Le NMBE est inférieur ou égal à 10% (ASHRAE, 2017);
3. Le CV(RMSE) est inférieur ou égal à 30% (ASHRAE, 2017).

Pour chaque régression qui respecte ces critères, le coefficient de déperditions thermiques effectif ($(UA)_{effectif}$) est calculé avec l'équation (4.11). Ensuite, on calcule pour chaque ATC la moyenne des coefficients de déperditions thermiques effectifs.

$$(UA)_{effectif} = \frac{(MC_p)_{briques}}{\tau} \cdot \frac{1\,000 \left[\frac{J}{kJ} \right]}{3\,600 \left[\frac{S}{h} \right]} \quad (4.11)$$

L'équation (4.12) indique la relation entre les pertes thermiques à chaque pas de temps ($\dot{Q}_{pertes,i}$), le coefficient moyen de déperditions thermiques ($(\overline{UA})_{effectif}$), la température moyenne des briques et la température ambiante. Les pertes thermiques saisonnières ($Q_{pertes,hiver}$) sont calculées avec l'équation (4.13).

$$\dot{Q}_{pertes,i} = \frac{(\overline{UA})_{effectif}}{1\,000 \left[\frac{W}{kW} \right]} \cdot (\bar{T}_{briques,i} - T_{amb}) \quad (4.12)$$

$$Q_{pertes,hiver} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{pertes,i} \cdot \Delta t \quad (4.13)$$

4.2.3.5 Calibration par bilan d'énergie

Des bilans d'énergie permettent de s'assurer de la cohérence des résultats obtenus et du respect du principe de conservation de l'énergie. Ces bilans servent à calibrer les valeurs calculées de puissance thermique fournie, d'énergie thermique fournie, de puissance appelée, d'énergie électrique consommée et de pertes thermiques. Le rendement énergétique est ensuite calculé à partir des valeurs calibrées. On réalise les quatre bilans d'énergie suivants :

1. Un bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en attente;
2. Un bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en charge;
3. Un bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en décharge;
4. Un bilan d'énergie pour toute la période d'hiver.

Les trois premiers bilans d'énergie visent respectivement à calibrer les pertes thermiques instantanées, la puissance électrique appelée et la puissance thermique fournie. Le quatrième bilan d'énergie vise à assurer la cohérence entre les pertes thermiques saisonnières, l'énergie électrique consommée et l'énergie thermique fournie entre le début et la fin de la période d'hiver analysée. L'équation (4.14) présente la formulation générale du bilan d'énergie, développée en prenant l'ATC comme volume de contrôle et pour une estampille temporelle i donnée. Cette équation générale sert aux trois premiers bilans d'énergie décrits précédemment.

$$Bilan_i = P_{Ch,i} - \dot{Q}_{D\acute{e}ch,i} - \dot{Q}_{pertes,i} - \frac{Q_{stock,i} - Q_{stock,i-1}}{\Delta t} \quad (4.14)$$

Où $Q_{stock,i} = (MC_p)_{briques} \cdot \bar{T}_{briques,i}$

Comme chacun des trois premiers bilans d'énergie considère un état en particulier de l'ATC, soit l'attente, la charge ou la décharge, l'équation (4.14) est simplifiée pour chacun d'entre eux. Le Tableau 4.4 présente l'équation de bilan d'énergie pour chaque état en particulier. Le Tableau 4.4 indique les causes possibles d'une valeur négative ou positive de bilan. La dernière colonne du tableau indique l'incertitude sur chaque bilan d'énergie dont les calculs détaillés sont présentés à l'Annexe VII. Les valeurs de bilan à un instant donné qui sont comprises dans la plage d'incertitude sont jugées acceptables. Un histogramme du nombre d'occurrences de

chaque valeur de bilan d'énergie à un instant donné permet de juger de l'équilibre du bilan d'énergie autour d'une valeur nulle et de calibrer, au besoin, les pertes thermiques instantanées, la puissance électrique appelée et la puissance thermique fournie.

Pour le quatrième bilan d'énergie, l'équation (4.14) est adaptée afin que les estampilles temporelles i et $i-1$ correspondent respectivement à la fin (f) et au début (d) de la période d'hiver. L'équation (4.15) décrit le quatrième bilan d'énergie qui considère les trois états de l'ATC et qui porte sur toute la période d'hiver. Pour juger de l'équilibre de ce bilan d'énergie, on compare la valeur obtenue avec son incertitude évaluée à ± 400 kWh (voir Annexe VII).

$$Bilan_{hiver} = E_{Ch,hiver} - Q_{Déch,hiver} - Q_{pertes,hiver} - \Delta Q_{stock,hiver} \quad (4.15)$$

$$\text{Où } \Delta Q_{stock} = \frac{(MC_p)_{briques}}{3600} \cdot (\bar{T}_{briques,f} - \bar{T}_{briques,d})$$

Tableau 4.4 Bilans d'énergie de l'ATC pour les trois états considérés et incertitudes

$Bilan_i < 0$	$Bilan_i > 0$	Incertaince sur $Bilan_i$
État d'attente : $Bilan_{Att,i} = -\dot{Q}_{pertes,i} - \frac{Q_{stock,i} - Q_{stock,i-1}}{\Delta t}$		
- Pertes thermiques trop élevées et/ou, - Taux de diminution de l'énergie stockée trop faible.	- Pertes thermiques trop faibles et/ou, - Taux de diminution de l'énergie stockée trop élevé.	ATC1 : ± 7 kW ATC2 : ± 7 kW ATC3 : ± 7 kW
État de charge : $Bilan_{Ch,i} = P_{Ch,i} - \dot{Q}_{pertes,i} - \frac{Q_{stock,i} - Q_{stock,i-1}}{\Delta t}$		
- Puissance électrique trop faible et/ou, - Pertes thermiques trop élevées et/ou, - Taux d'augmentation de l'énergie stockée trop élevé.	- Puissance électrique trop élevée et/ou, - Pertes thermiques trop faibles et/ou, - Taux d'augmentation de l'énergie stockée trop faible.	ATC1 : ± 7 kW ATC2 : ± 7 kW ATC3 : ± 7 kW
État de décharge : $Bilan_{Déch,i} = -\dot{Q}_{Déch,i} - \dot{Q}_{pertes,i} - \frac{Q_{stock,i} - Q_{stock,i-1}}{\Delta t}$		
- Puissance thermique trop élevée et/ou, - Pertes thermiques trop élevées et/ou, - Taux de diminution de l'énergie stockée trop faible.	- Puissance thermique trop faible et/ou, - Pertes thermiques trop faibles et/ou, - Taux de diminution de l'énergie stockée trop élevé.	ATC1 : ± 7 kW ATC2 : ± 8 kW ATC3 : ± 8 kW

4.2.3.6 Rendement énergétique

Le rendement énergétique, soit le ratio entre l'énergie thermique fournie ($Q_{Déch,hiver}$) et l'énergie électrique consommée ($E_{Ch,hiver}$), est un indicateur de performance énergétique de l'ATC. L'équation (4.16) exprime le calcul du rendement énergétique pour la période d'hiver ($\eta_{ATC,hiver}$). Ce rendement correspond donc à une valeur moyenne saisonnière.

$$\eta_{ATC,hiver} = \frac{Q_{Déch,hiver}}{E_{Ch,hiver}} \quad (4.16)$$

4.2.4 Étape 4 : Établir un scénario de substitution

Le scénario de substitution sert à comparer les impacts des ATC à ceux d'une autre solution qui aurait pu être retenue dans un contexte similaire de réfection de chaufferie et en concordance avec l'exemplarité de l'État. Pour le cas spécifique du site #10, le scénario de substitution considéré est dénommé « biénergie ». Avant l'installation des ATC, le site #10 comprenait déjà des équipements de chauffage alimentés par une source d'énergie fossile, le mazout. Après l'installation des ATC, le mazout a été conservé parmi les sources d'énergie pour le chauffage. Suivant l'exemplarité de l'État, la consommation totale annuelle (CTA) de combustible ne doit pas excéder 15% de la CTA d'énergie du bâtiment. La CTA de combustible du site #10, après l'installation des ATC, a été de 11% en moyenne entre 2017 et 2020, donc en deçà du seuil de 15%. L'exemplarité de l'État vise également à remplacer les systèmes au mazout utilisés comme **source principale de chauffage** par des systèmes utilisant des sources renouvelables d'énergie, dont l'électricité. Utiliser le mazout en substitution de l'énergie fournie par les ATC n'est donc pas envisageable. On retient plutôt le gaz naturel comme source d'énergie de substitution, jusqu'à concurrence de 15% de la CTA d'énergie, ce qui était à la fois permis par le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016) et qui est toujours permis par le Plan pour une économie verte 2030 (Gouvernement du Québec, 2020) afin de mitiger les pointes hivernales de demande d'électricité. Ainsi, le scénario de substitution retenu est la **biénergie électricité-gaz naturel et le mazout est entièrement retiré**, tel qu'illustré sur la

Figure 4.4. On considère aussi que la consommation **actuelle** de mazout (c.-à-d. après l'installation des ATC) est entièrement convertie en gaz naturel. La comparaison avec le scénario de substitution inclut **uniquement les impacts induits par les ATC**, et non ceux attribuables à la conversion du mazout vers le gaz naturel. On admet l'hypothèse que le rendement énergétique saisonnier de la chaudière au gaz naturel est le même que celui de la chaudière au mazout : les consommations d'énergie des deux sources sont donc les mêmes.

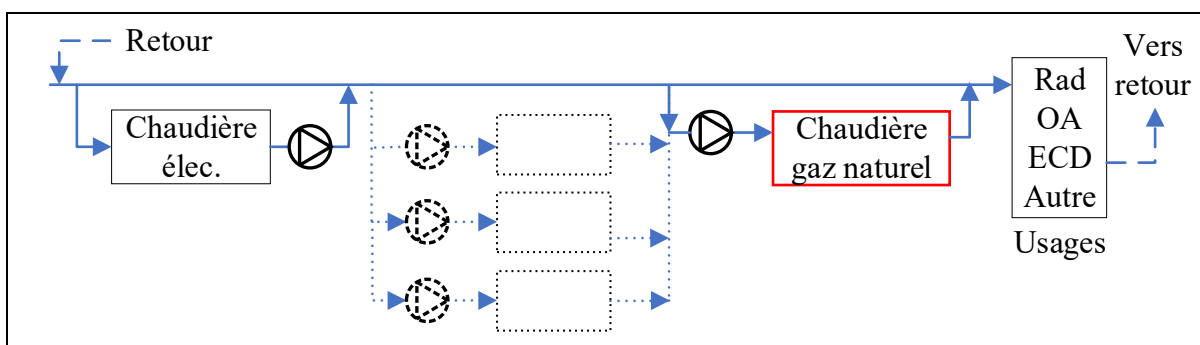


Figure 4.4 Schéma du réseau de chauffage du site #10 selon un scénario biénergie

Les impacts qui sont comparés portent sur la puissance appelée du bâtiment, la consommation d'électricité, la consommation de combustible, la consommation totale d'énergie, les coûts énergétiques et les émissions de GES. Les paragraphes 4.2.4.1 à 4.2.4.5 qui suivent présentent la méthodologie de calcul de chacun de ces impacts.

4.2.4.1 Puissance appelée et consommation d'électricité du bâtiment

La puissance électrique appelée du bâtiment du scénario de substitution correspond à la puissance appelée du bâtiment sans la charge des ATC. L'équation (4.17) permet de calculer la puissance appelée du bâtiment du scénario de substitution, $P_{elec,subst,i}$. Pour considérer le fait que les données de puissance électrique appelée du bâtiment sont une mesure moyenne sur 15 minutes ($P_{elec,bât,i}$), alors que les profils calculés de puissance ($P_{Ch,i,ATCn}$) des ATC sont des valeurs instantanées, on calcule la puissance moyenne appelée par les ATC sur une période de 15 minutes. C'est ce qui est représenté par le facteur $\frac{1}{2}$ et les estampilles temporelles i et $i-1$ dans l'équation (4.17). L'impact sur la puissance appelée du bâtiment, un indicateur de

performance, est analysé en comparant le profil de puissance du scénario avec ATC à celui du scénario de substitution et en comparant les appels maximaux mensuels de puissance.

$$P_{elec,subst,i} = P_{elec,bât,i} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^3 (P_{Ch,i,ATCn} + P_{Ch,i-1,ATCn}) \quad (4.17)$$

L'énergie électrique consommée par le bâtiment pendant la période d'hiver et selon le scénario de substitution ($E_{elec,subst,hiver}$) est calculée avec l'équation (4.18).

$$E_{elec,subst,hiver} = \sum_{i=1}^N P_{elec,subst,i} \cdot \Delta t \quad (4.18)$$

Le facteur d'utilisation (FU), soit le ratio entre l'énergie électrique consommée pendant un mois ($E_{elec,mois}$) et la puissance maximale appelée pendant ce mois (P_{max}) multipliée par le nombre d'heures (H_{mois}), est calculé pour chaque mois et pour chaque scénario en utilisant l'équation (4.19). Tel que mentionné dans la revue de la littérature, ce facteur indique à quel point la consommation mensuelle d'énergie est élevée par rapport à la puissance maximale appelée pendant ce même mois. L'utilisation d'ATC pour le nivelage de la demande devrait augmenter le FU par rapport au scénario de substitution en augmentant la consommation d'électricité, tout en gardant une puissance maximale appelée pratiquement inchangée.

$$FU = \frac{E_{elec,mois}}{P_{max} \cdot H_{mois}} \quad (4.19)$$

4.2.4.2 Consommation de combustible

Dans le scénario de substitution biénergie, l'énergie thermique fournie par les ATC est fournie par la chaudière au gaz naturel montrée sur la Figure 4.4. La consommation de gaz naturel est ainsi supérieure à celle du scénario avec ATC. Pour le cas spécifique du site #10, il est possible de substituer entièrement l'énergie thermique fournie par les ATC et la consommation actuelle

de mazout par du gaz naturel, tout en respectant le critère d'exemplarité de l'État (c.-à-d. que la CTA de combustible est inférieure à 15% de la CTA d'énergie). Les équations (4.20) à (4.22) décrivent respectivement le calcul de la consommation de gaz naturel, en termes de puissance thermique en kW, d'énergie en kWh et de volume en m³. Le facteur de conversion de volume (FC) vaut 3,78541 L/Gal_{us}. Le pouvoir calorifique du mazout ($P_{cal,maz}$) est de 0,0388 GJ/L et celui du gaz naturel ($P_{cal,Gnat}$) est de 0,03789 GJ/m³ (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2020). Le rendement de combustion de la chaudière au gaz naturel (η_{comb}) est de 83% (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016).

$$\dot{Q}_{comb,subst,i} = \frac{\dot{V}_{comb,i} \cdot FC \cdot P_{cal,maz}}{0,0036 \left[\frac{GJ}{kWh} \right]} + \frac{1}{\eta_{comb}} \sum_{n=1}^3 \dot{Q}_{Déch,i,ATCn} \quad (4.20)$$

$$Q_{comb,subst,hiver} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{comb,subst,i} \cdot \Delta t \quad (4.21)$$

$$V_{comb,subst,hiver} = \frac{Q_{comb,subst,hiver} \cdot 0,0036 \left[\frac{GJ}{kWh} \right]}{P_{cal,GNat}} \quad (4.22)$$

Le premier terme de l'équation (4.20), $\dot{V}_{comb,i} \cdot FC \cdot P_{cal,maz} \cdot 0,0036^{-1}$ [kWh/GJ], est utilisé pour convertir la consommation actuelle de mazout en gaz naturel pour le scénario avec ATC. Les équations (4.21) et (4.22) permettent de l'exprimer en kWh et en m³. L'impact sur la consommation de gaz naturel est calculé en soustrayant les consommations des deux scénarios.

4.2.4.3 Consommation totale d'énergie

La consommation totale d'énergie du bâtiment selon le scénario de substitution est calculée en additionnant la consommation d'électricité ($E_{elec,subst,hiver}$) et de combustible ($Q_{comb,subst,hiver}$) de la période d'hiver. Un calcul similaire est fait pour le scénario avec ATC. On calcule ensuite

la différence entre les consommations des deux scénarios afin de déterminer s’il y a réduction ou augmentation nette de la consommation totale d’énergie, toutes sources confondues.

4.2.4.4 Coûts énergétiques

Les coûts d’électricité et de combustible de chaque scénario, avec ATC et biénergie, sont calculés afin d’évaluer l’impact des ATC sur les coûts d’énergie et de puissance qui est un des indicateurs de performance retenus. Le portail Hélios indique que le site #10 comprend un seul compteur d’électricité abonné au tarif M d’Hydro-Québec. Pour le gaz naturel, on suppose que le site serait abonné au tarif de service général D1 d’Énergir. Le Tableau 4.5 présente les coûts unitaires de chaque source d’énergie. Ces coûts unitaires, multipliés par les consommations d’énergie électrique, l’appel maximal mensuel de puissance et le volume consommé de gaz naturel, permettent de calculer le coût énergétique total pour chacun des scénarios pour la période d’hiver. On compare ensuite le coût total de chaque scénario pour évaluer s’il y a réduction ou augmentation nette des coûts.

Tableau 4.5 Coûts unitaires des sources d’énergie

Source d’énergie et tarif		Coût unitaire	Références
Électricité Tarif M	Énergie 1 ^{ère} tranche (< 210 000 kWh)	0,05095\$/kWh	Tarifs d’Hydro-Québec en vigueur à partir du 1 ^{er} avril 2021 (Hydro-Québec, 2021).
	Énergie 2 ^e tranche (> 210 000 kWh)	0,03778\$/kWh	
	Appel de puissance	14,77\$/kW	
Gaz naturel Tarif D1	Fourniture du gaz	0,105\$/m ³	Tarifs moyens d’Énergir entre déc. 2020 et avril 2021 (Énergir, 2021).
	SPEDE*	0,040\$/m ³	
	Transport, équilibrage, inventaire	0,080\$/m ³	Hypothèse basée sur les factures du site #11 présenté par D’Avignon (2022) entre déc. 2020 et avril 2021.
	Distribution	0,150\$/m ³	
	Total (calcul)	0,380\$/m ³		s. o.
*SPEDE : Système de plafonnement et d’échange de droits d’émission			

4.2.4.5 Émissions de GES

Les émissions de GES attribuables à chaque scénario sont estimées en multipliant la consommation d'énergie de chaque source, l'électricité et le gaz naturel, par le facteur d'intensité des émissions (FE) correspondant, tel que décrit par l'équation (4.23). Cette équation décrit le calcul spécifiquement pour le scénario de substitution avec l'indice $subst$. Les émissions de GES du scénario avec ATC sont calculées de manière analogue. L'impact sur les émissions de GES, un indicateur de performance, est déterminé en soustrayant les émissions liées aux deux scénarios. Le Tableau 4.6 présente les facteurs d'intensité des émissions de GES considérés pour chaque source d'énergie. Dû à un facteur environ 100 fois plus faible pour l'électricité consommée au Québec que le gaz naturel, le scénario avec ATC, dont la consommation de combustible est moindre que le scénario biénergie, réduit les émissions de GES.

$$E_{GES,subst} = FE_{elec} \cdot E_{elec,subst,hiver} + FE_{GNat} \cdot Q_{comb,subst,hiver} \quad (4.23)$$

Tableau 4.6 Facteur d'intensité des émissions de GES par source d'énergie
Adapté de Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2020)

Source d'énergie	Facteur d'intensité des émissions de GES (kgCO ₂ éq/kWh)
Électricité	0,0016
Gaz naturel	0,1804

4.3 Résultats et analyses de la performance des ATC du site #10

Cette section présente les résultats et l'analyse de la performance des trois ATC du site #10. Les sous-sections 4.3.1 à 4.3.4 suivent respectivement les étapes 1 à 4 de la méthode.

4.3.1 Données disponibles, manquantes et aberrantes

Les données de la période d'analyse sont comprises entre le 2 décembre 2020 13h30 et le 7 mai 2021 2h45 avec un pas de temps de 15 minutes, totalisant ainsi 14 930 estampilles. Le

Tableau 4.7 présente l'étendue des valeurs et le nombre de valeurs aberrantes; celles qui sont hors de l'étendue attendue définie dans le Tableau 4.2. Les variables ayant des valeurs aberrantes sont les températures des noyaux de briques de l'ATC2 et 3 dont environ 10% des estampilles de la période d'analyse (1 525/14 930) ont une valeur de 0°C. Ces valeurs sont consécutives entre le 22 décembre 14h et le 7 janvier 11h. Cette période n'est pas incluse dans les résultats qui seront présentés pour ces deux ATC comme mentionné au paragraphe 4.2.1.1. Hormis ces valeurs aberrantes, les températures minimales des noyaux indiquées dans le Tableau 4.7 valent 65°C pour l'ATC2 et 76°C pour l'ATC3.

Le Tableau 4.7 indique le nombre de valeurs qui manquent pendant une durée inférieure à 1h30, une durée supérieure ou égale à 1h30 et le nombre total de valeurs manquantes. Le nombre de valeurs manquantes pendant une durée inférieure à 1h30 varie entre 2 et 32, ce qui est relativement faible par rapport au nombre total d'estampilles de 14 930. Le paragraphe 4.2.1.1 a décrit comment ces valeurs manquantes ont été interpolées. Les valeurs manquantes pendant une durée supérieure ou égale à 1h30 sont les données de température de l'eau à la sortie de l'échangeur de chaleur ($T_{out,éch}$), la température extérieure (T_{ext}) et le débit volumique de mazout consommé (\dot{V}_{comb}). Ces données manquent pendant des périodes continues variant entre 3 et 36 jours. Le paragraphe 4.2.1.1 a décrit la méthode d'estimation de $T_{out,éch}$. Une méthode d'estimation n'a pas été requise pour les données manquantes de T_{ext} , puisque cette variable n'entre pas directement dans le calcul d'un indicateur de performance. Quant à \dot{V}_{comb} , il n'y a pas d'autre donnée disponible permettant de l'estimer. Le nombre de valeurs manquantes ($\geq 1h30$) de \dot{V}_{comb} , 171, est négligeable par rapport au total de 14 930 estampilles.

Tableau 4.7 Nombre de valeurs aberrantes et manquantes de la période d'analyse

Symbole	ATC	Étendue	Unités	Nb valeurs aberrantes	Nb valeurs manquantes		
					(<1h30)	(≥1h30)	Total
$T_{in,ATC}$	1,2,3	57,5 à 88,8	°C	0	4	0	4
$T_{out,ATCn}$	1	43,8 à 85,9	°C	0	32	0	32
	2	29,2 à 88,1		0	32	0	32
	3	36,1 à 89,3		0	32	0	32
$T_{out,éch}$	1	53 à 90	°C	0	6	1 834	1 840
	2	34 à 90		0	6	3 359	3 365
	3	42 à 90		0	6	3 359	3 365
$T_{out,cons}$	1,2,3	69 à 90	°C	0	32	0	32
$T_{briques,n}$ ($n = 1 \text{ à } 3$)	1	76 à 826	°C	0	6	0	6
	2	(0) 65 à 832	°C	1 525	6	0	6
	3	(0) 76 à 832	°C	1 525	6	0	6
$T_{briques,cons}$	1,2,3	200 à 800	°C	0	6	0	6
T_{ext}	s. o.	-18,7 à 17,1	°C	0	32	171	203
MOD	1	0 à 100	%	0	6	0	6
	2			0	6	0	6
	3			0	6	0	6
$AutCh$	1	0 ou 1	s. o.	0	6	0	6
	2			0	6	0	6
	3			0	6	0	6
$AutDéch$	1	0 ou 1	s. o.	0	4	0	4
	2			0	4	0	4
	3			0	4	0	4
v_{Vent}	1	0 à 99,6	%	0	4	0	4
	2			0	4	0	4
	3			0	4	0	4
$P_{élec,bât}$	s. o.	112,5 à 1 109,7	kW	s. o.	5	0	5
$P_{délestage,bât}$	s. o.	650 à 1 100	kW	s. o.	5	0	5
\dot{V}_{comb}	s. o.	0 à 33,1	Gal _{us} /h	s. o.	2	171	173

4.3.2 Mode de contrôle et utilisation des ATC

Le Tableau 4.8 présente les valeurs des principaux canaux CLoc des ATC du site #10 et leur signification. Ces valeurs indiquent qu'un panneau de relais SSR module la puissance électrique des éléments chauffants en fonction de la consigne (MOD) que le BMS communique au contrôleur de l'ATC. Selon ce mode de contrôle, les éléments chauffants d'un même noyau

sont tous mis sous tension lors de la charge. La charge d'un noyau est permise jusqu'à ce que sa température atteigne la consigne $T_{briques,cons,int}$ calculée avec l'équation (4.7), soit 826°C pour les ATC du site #10.

Tableau 4.8 Principaux canaux de configuration CLoc des ATC du site #10

CLoc	Valeur	Signification
CLoc007	ATC1,2,3 : 90	La température maximale autorisée de l'eau à la sortie de l'ATC est de 90°C.
CLoc010	ATC1,2,3 : 2	La consigne de température des briques est contrôlée en mode manuel.
CLoc011	ATC1,2,3 : 2	
CLoc014	ATC1 : 2 ATC2 : 0 ATC3 : 0	La température de l'eau mesurée à la sortie de l'ATC1 a une valeur de calibration de 2°C. Cette valeur est nulle pour l'ATC2 et 3.
CLoc015	ATC1,2,3 : 100	En mode manuel, le niveau de charge ciblé est de 100%, donc la température ciblée par le contrôleur de l'ATC pour chaque noyau de briques est égale à L040.
CLoc035	ATC1,2,3 : 8	Une sonde de température extérieure n'est pas directement raccordée à l'ATC.
CLoc040	ATC1,2,3 : 826	La température maximale autorisée des briques est de 826°C.
CLoc041	ATC1,2,3 : 93	La température des briques correspondant à un niveau de charge de 0% est de 93°C.
CLoc052	ATC1 : 4 ATC2 : 7 ATC3 : 7	Tous les éléments chauffants d'un noyau de briques sont mis sous tension lorsque le noyau est en charge.
CLoc053	ATC1,2,3 : 192	Le panneau de relais SSR est activé et la consigne de modulation de puissance est transmise au contrôleur de l'ATC par un port de communication.
CLoc055	ATC1,2,3 : 2	La consigne de température de l'eau à la sortie de l'échangeur de chaleur de l'ATC est transmise au contrôleur de l'ATC par un port de communication.

Les canaux présentés dans le Tableau 4.8 renseignent sur la configuration du contrôleur de l'ATC. La Figure 4.5 représente quant à elle l'**interaction** entre le BMS et le contrôleur interne. L'algorithme utilisé par le BMS qui définit la consigne de modulation de puissance électrique (*MOD*) est montré sur la figure. Pour qu'une consigne *MOD* non nulle soit transmise au contrôleur de l'ATC, il faut qu'il y ait **possibilité** de charger l'ATC et un **besoin** de le charger. Lorsque l'ATC a l'autorisation de se charger ($AutCh = 1$) et que de la puissance est disponible ($P_{d\acute{e}lestage,b\grave{a}t} - P_{\acute{e}lec,b\grave{a}t} > 0$), la charge est **possible**. Lorsque l'écart entre la consigne

et la température moyenne des briques est supérieur à zéro ($T_{briques,cons} - \bar{T}_{briques} > 0$), la charge est **requis**. Le minimum entre la puissance disponible et la puissance requise pour atteindre la consigne de température des briques fixe la valeur de MOD .

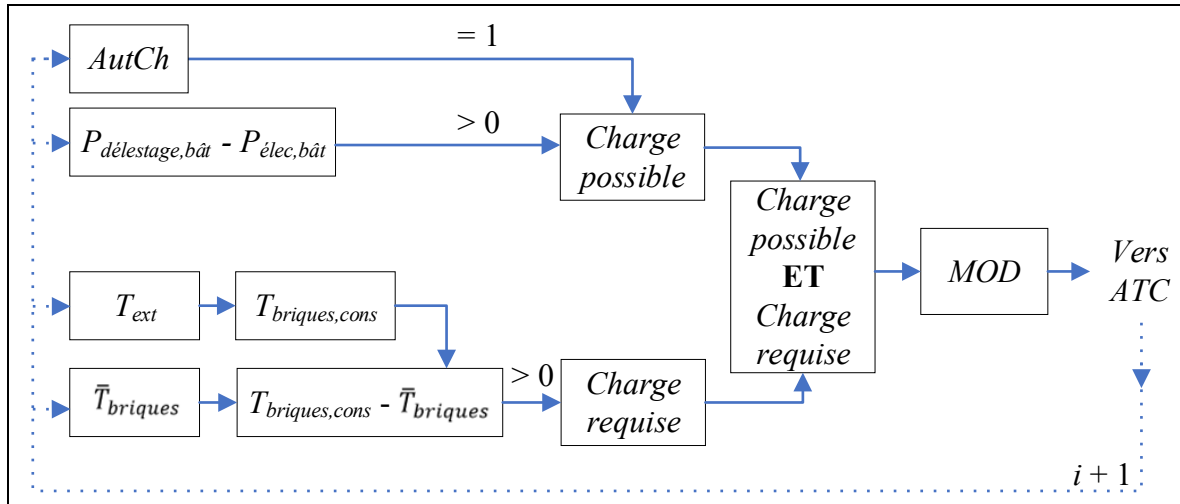


Figure 4.5 Contrôle de la charge des ATC du site #10

Le BMS établit la consigne $T_{briques,cons}$ en fonction de la température extérieure actuelle comme le montrent les croix bleues sur la Figure 4.6 à la page suivante. Cette figure montrant la consigne de température des briques est un exemple de ce qui a été discuté au Chapitre 3 et qui a des implications tant au niveau de la conception, de l'opération que de la maintenance. La courbe noire sur cette figure montre la relation, calculée avec l'équation (4.24), qui concorde à $\pm 10^\circ\text{C}$ près avec 92% des consignes $T_{briques,cons}$ de la période d'hiver. Il n'a pas été possible de cerner les raisons pour lesquelles certaines consignes divergent de la courbe noire. Ces dernières sont par ailleurs toutes comprises entre le 2 et le 11 décembre 2020. Le CV(RMSE) entre la consigne calculée avec l'équation (4.24) et celle calculée par le BMS est de 3%, indiquant que les écarts entre la courbe noire et les consignes calculées par le BMS sont faibles par rapport aux consignes qui varient entre 200 et 800°C.

$$T_{briques,cons} = \begin{cases} 800, & \text{si } T_{ext} \leq -15 \\ -24 \cdot T_{ext} + 440, & \text{si } -15 < T_{ext} < 10 \\ 200, & \text{si } T_{ext} \geq 10 \end{cases} \quad (4.24)$$

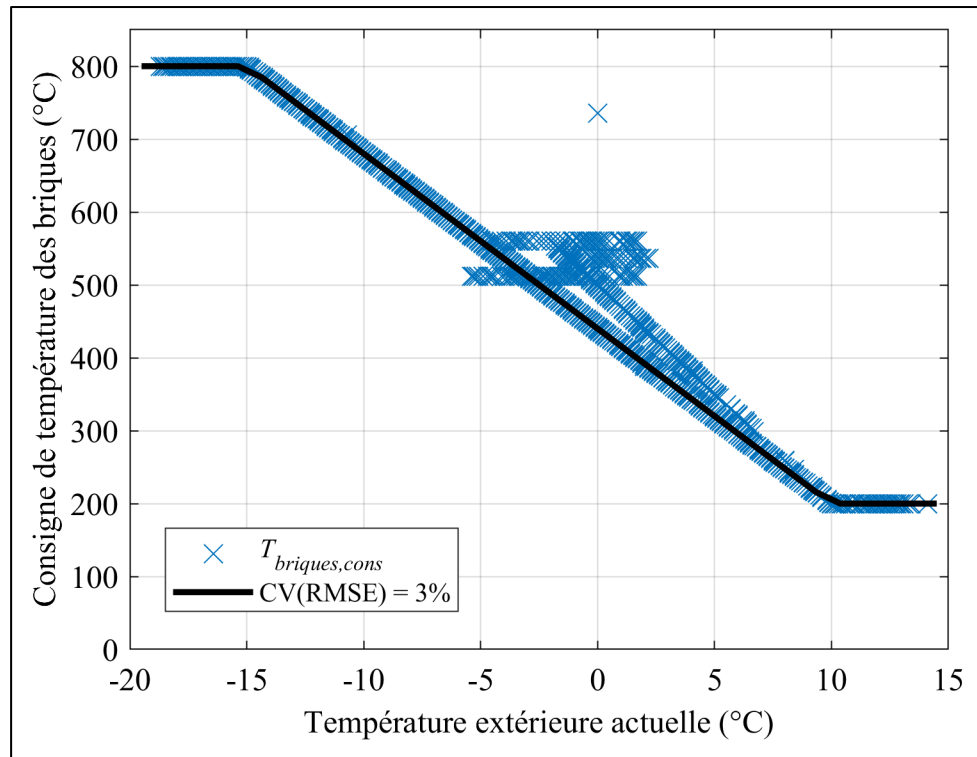


Figure 4.6 Consigne de température des briques des ATC du site #10 en fonction de la température extérieure actuelle

La Figure 4.7 montre la consigne de température des briques, les croix bleues, entre le 18 et le 20 janvier 2021 et la température moyenne des briques de l'ATC1, les points verts. Les périodes de charge correspondent aux instants pendant lesquels l'autorisation de charge (*AutCh*) vaut 1 et se produisent entre 16 h et 9 h environ. La consigne *MOD* est non nulle pendant ces périodes lorsqu'il y a un écart entre la température moyenne des briques et la consigne (Charge requise) et lorsque la puissance électrique appelée du bâtiment est inférieure à la puissance de délestage (Charge possible), ce qui est cohérent avec la Figure 4.5. Il faut noter qu'entre 16 h et 23 h environ, la puissance appelée du bâtiment oscille autour de la puissance de délestage alors que l'ATC est en charge. La puissance appelée par l'ATC permet donc ce nivelage, ce qui sera discuté au paragraphe 4.3.4.1. On remarque que la température moyenne des briques augmente durant les périodes de charge jusqu'à atteindre la consigne. L'élévation de la température des briques est plus rapide lorsque *MOD* vaut entre 60 et 100%. Les consignes *MOD* entre 0 et 40% maintiennent la consigne de température des briques.

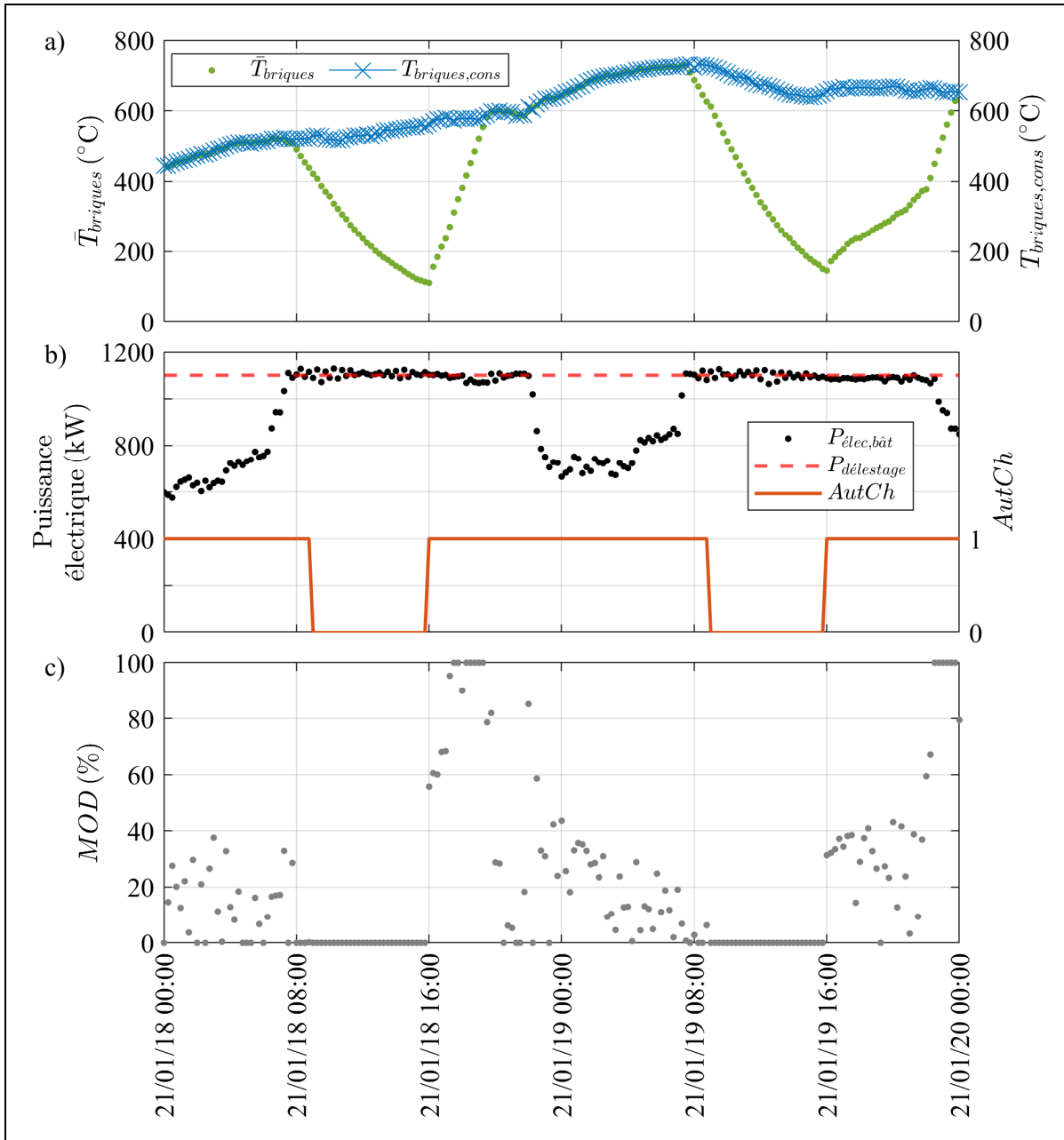


Figure 4.7 Périodes de charge de l'ATC1 entre le 18 et le 20 janvier 2021

Quant à la décharge, le BMS transmet à l'ATC l'autorisation ($AutDéch$) et la température de l'eau à atteindre ($T_{out,cons}$) comme le montre la Figure 4.8. Le contrôleur de l'ATC module la vitesse commandée au moteur du ventilateur (v_{vent}) en fonction de l'écart entre la consigne et la température de l'eau affichée au canal RLoc114. Comme le montre la Figure 4.9, le

contrôleur active le ventilateur de l'ATC1 à 3:00 alors que la température affichée au canal RLoc114 devient inférieure à la consigne. Il module ensuite sa vitesse pour réduire l'écart entre Rloc114 et la consigne. Or, avec une valeur de 2 au canal CLoc014 (voir Tableau 4.8), la **température mesurée** vaut en fait 2°C de moins que **celle affichée au canal RLoc114**, tel que l'indique l'équation sur la Figure 1.7 : $T_{out,éch} = RLoc114 - CLoc014$. Cela soutient l'importance de calibrer la valeur de CLoc014 lors de la mise en service, sans quoi la valeur par défaut de 5 va maintenir la température de l'eau à la sortie de l'échangeur sous la consigne.

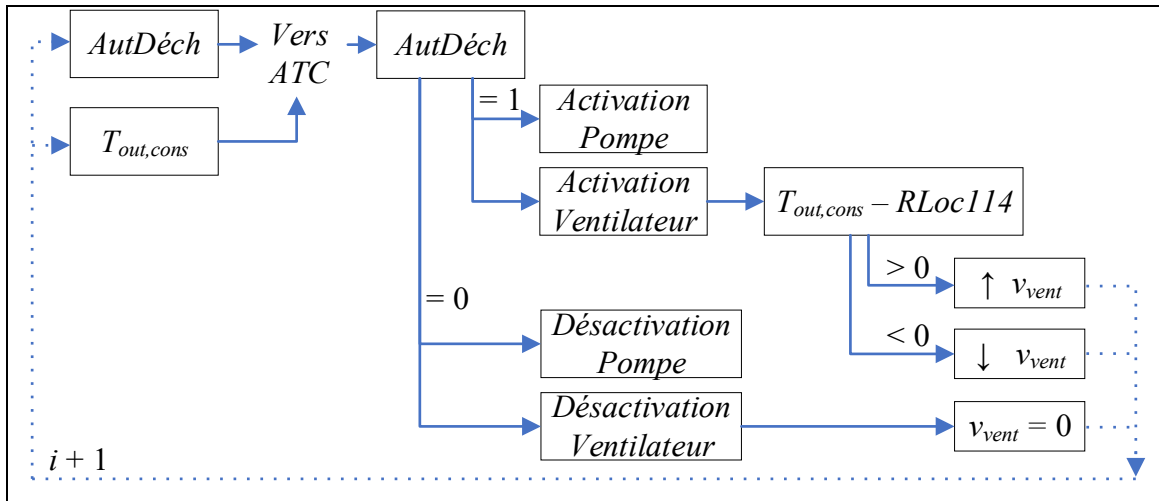


Figure 4.8 Contrôle de la décharge de l'ATC hydraulique

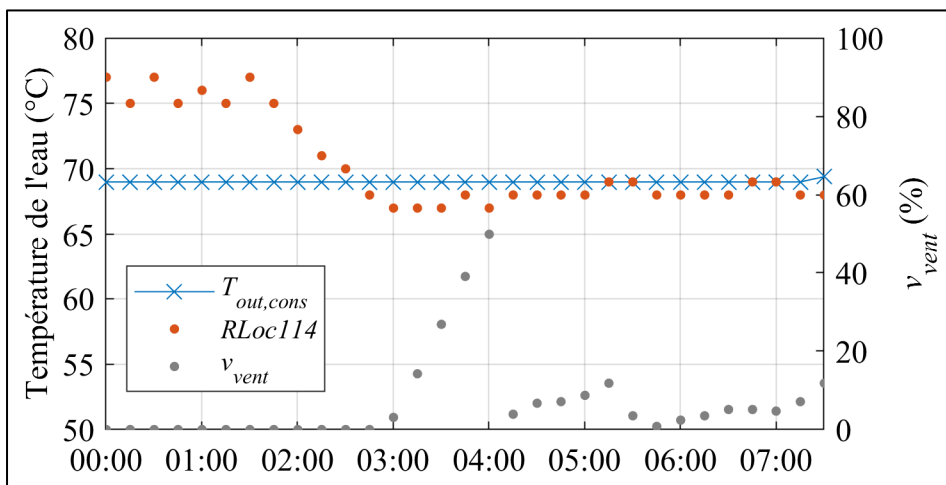


Figure 4.9 Modulation de la vitesse commandée au moteur du ventilateur de l'ATC1 en fonction de RLoc114

La Figure 4.10 montre deux décharges de l'ATC1 entre le 18 et le 20 janvier 2021 qui débutent vers 7 h et se terminent vers 16 h. Durant ces décharges, la consigne de température de l'eau à la sortie de l'ATC, les croix bleues, est constante à 90°C et la température de l'eau à l'entrée, les points jaunes, se maintient à environ 65°C. Comme l'écart demandé d'environ 25°C est très élevé, la vitesse commandée au moteur du ventilateur, les points gris, est de 100%. La température de l'eau mesurée à la sortie de l'échangeur de chaleur ($T_{out,éch}$), les points noirs, n'atteint pas la consigne. D'ailleurs, d'après la conclusion tirée de la Figure 4.9, la valeur de CLoc014 réduit la température « réellement » visée par le contrôleur de 2°C; elle vaut donc 88°C. La différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur (ΔT_{eau}), calculée selon l'équation (4.3) et représentée par les points verts, est élevée au début de la décharge. Cela indique que l'ATC fournit une puissance thermique significative au réseau hydronique à ces moments, bien qu'il ne parvienne pas à combler entièrement l'écart demandé.

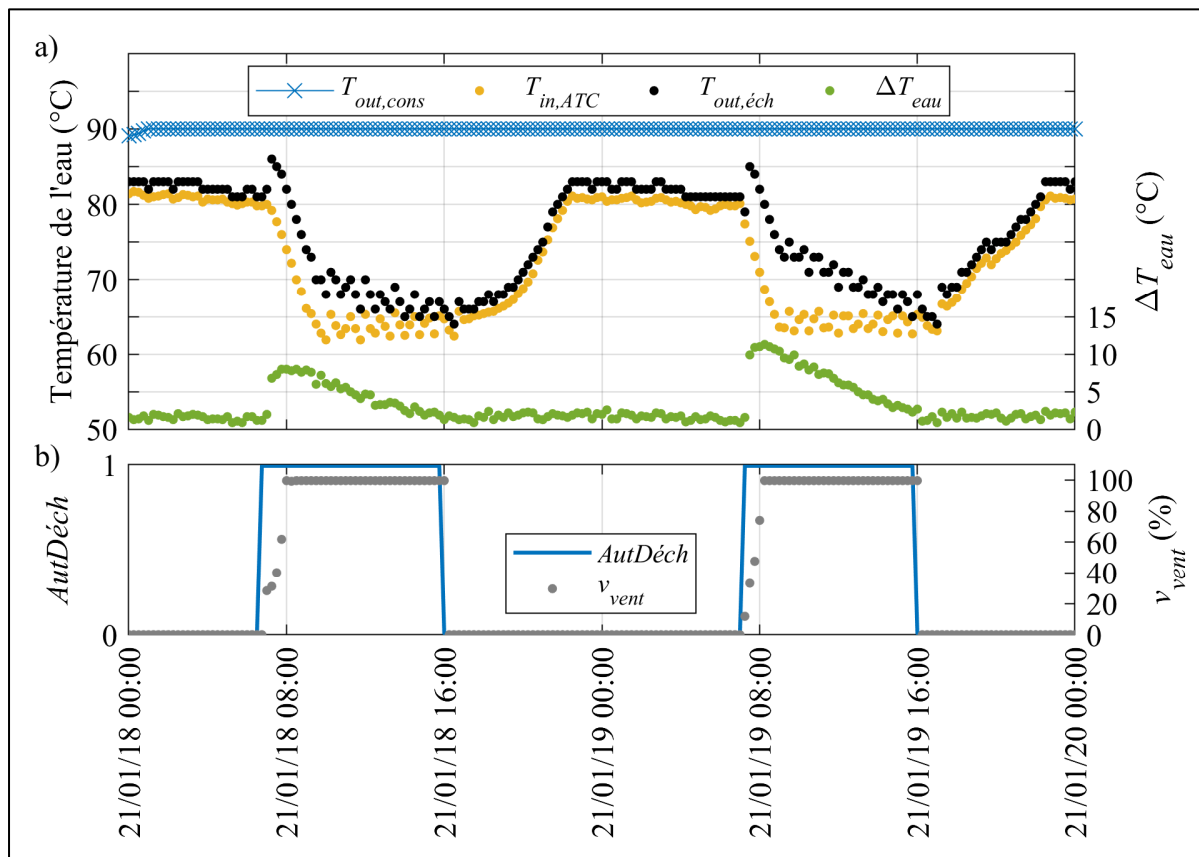


Figure 4.10 Périodes de décharge de l'ATC1 entre le 18 et le 20 janvier 2021

En comparant la Figure 4.7 et la Figure 4.10, on remarque que les périodes de charge et de décharge ne coïncident pas. En fait, les ATC du site #10 sont soit en charge, en décharge ou en attente; ils ne sont en charge et décharge simultanées que pendant les transitions entre ces états. La Figure 4.11 montre comment un tel mode d'opération se reflète sur les températures mesurées des noyaux de briques. Cette figure montre que pendant la charge, les températures des noyaux augmentent, alors qu'elles diminuent pendant la décharge et l'attente. Puisque les températures des trois noyaux suivent la même tendance, la moyenne de celles-ci est appropriée pour estimer la quantité d'énergie thermique stockée. Sur la Figure 4.11, on remarque tout de même des écarts de plus de 100°C entre les noyaux, particulièrement lors de la charge et de l'attente. À ce moment, il n'y a pas de circulation d'air dans l'ATC, donc aucune convection forcée permettant d'homogénéiser la température des noyaux. À l'inverse, lors de la décharge, on remarque que l'écart de température entre les noyaux est moindre.

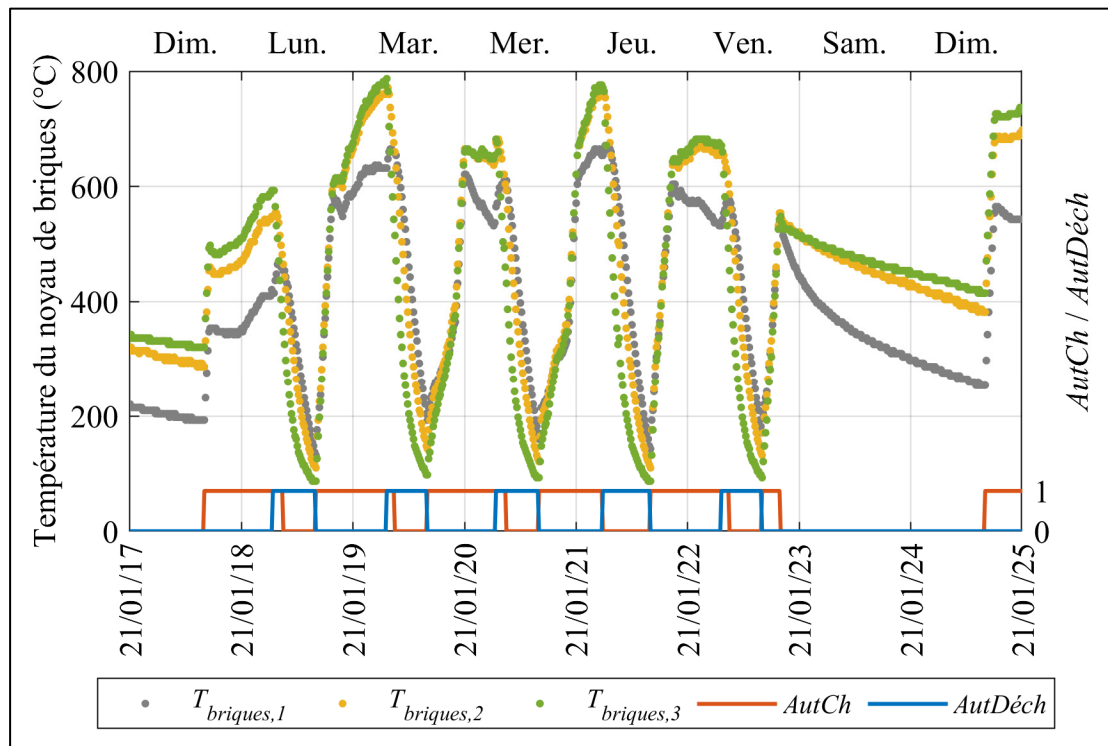


Figure 4.11 Températures des trois noyaux de briques, autorisations de charge et de décharge de l'ATC1 entre le 17 et le 25 janvier 2021

Les autorisations de charge et de décharge sont montrées pour quelques jours seulement sur la Figure 4.11, mais elles sont récurrentes du lundi au vendredi, soit les jours où le bâtiment scolaire est le plus occupé.²⁸ Du lundi au vendredi, les ATC effectuent quotidiennement un seul cycle de charge et de décharge.

La Figure 4.12 montre le profil de puissance appelée du bâtiment qui permet de cibler les périodes de pointe. On constate que le profil est récurrent du lundi au vendredi et avoisine la puissance de délestage de 1 100 kW pendant les heures d'occupation. Les ATC ont l'autorisation de se décharger et le débit volumique de mazout consommé est modulé lorsque la puissance appelée est proche de la puissance de délestage. La décharge des ATC et l'usage de combustible permettent d'écrêter la puissance appelée en période de pointe. La Figure 4.7 a montré que les ATC sont chargés vers la fin des périodes de pointe, lorsqu'il y a de la puissance disponible, permettant de niveler la puissance appelée du bâtiment. Ainsi, les ATC sont utilisés pour faire une « gestion de pointe » liée au chauffage, une utilisation qui a été discutée au Chapitre 3. Durant la fin de semaine, la puissance appelée se maintient à un niveau plus bas que du lundi au vendredi; les ATC n'ont pas l'autorisation de se décharger et le débit volumique de mazout consommé est nul.

²⁸ La charge des ATC est autorisée du lundi au jeudi entre 16 h et 9 h, le vendredi entre 16 h et 20 h et à compter de 16 h le dimanche. La décharge est autorisée du lundi au vendredi, le plus fréquemment entre 7 h et 16 h.

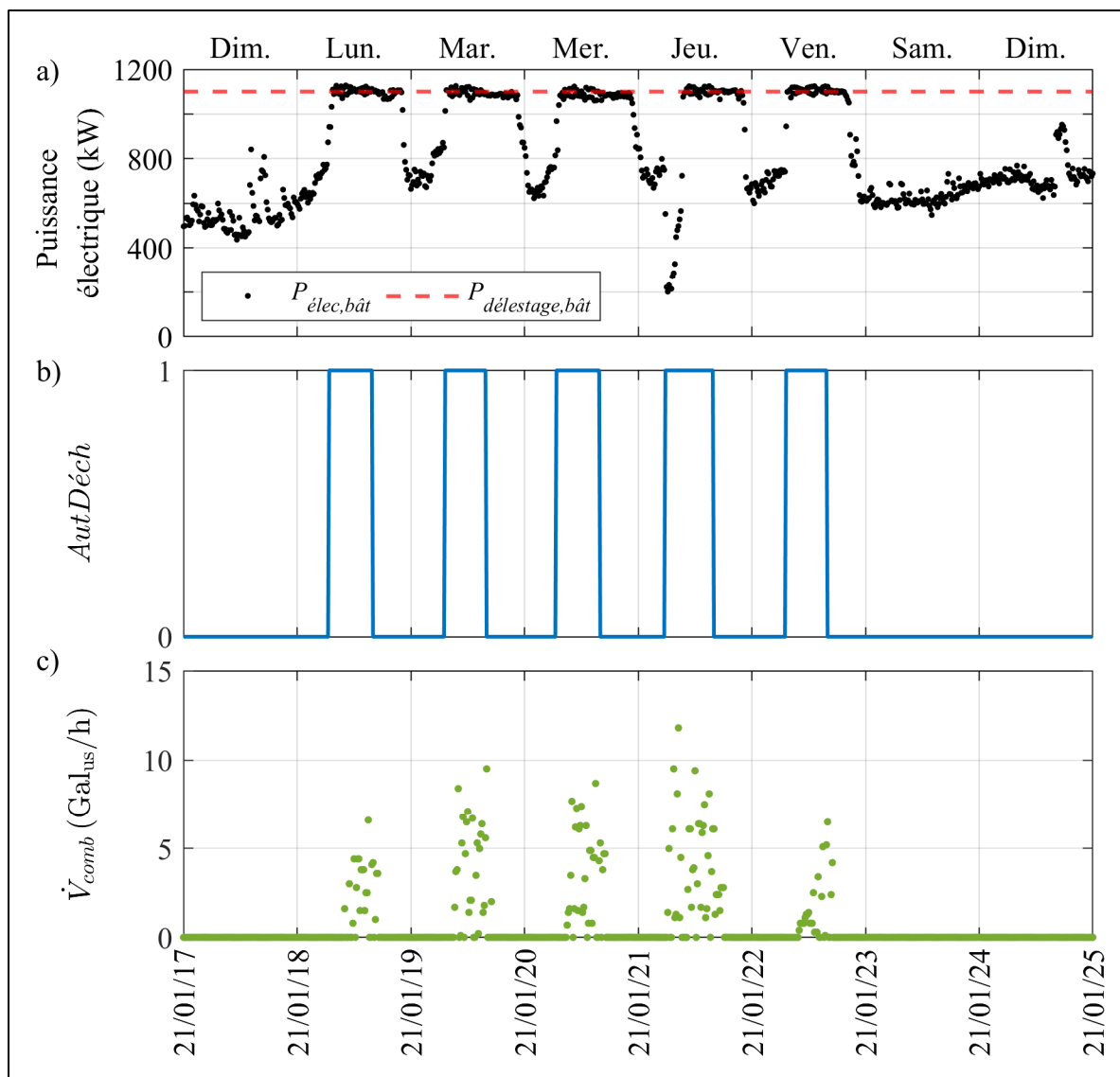


Figure 4.12 Profil de puissance appelée du bâtiment et gestion de la demande liée au chauffage par la décharge des ATC et l'écrêtage avec du combustible

4.3.3 Performance énergétique des ATC

Cette sous-section présente, aux paragraphes 4.3.3.1 à 4.3.3.4 qui suivent, les résultats des paramètres énergétiques des ATC, soit : les débits d'eau, la puissance et l'énergie thermique fournies, la puissance appelée et l'énergie électrique consommée et les pertes thermiques. Les résultats de la calibration par bilan d'énergie (paragraphe 4.3.3.5) et du calcul des rendements énergétiques des ATC (paragraphe 4.3.3.6) sont ensuite présentés. Finalement, le paragraphe 4.3.3.7 clôt cette sous-section par une analyse globale de la performance des ATC du site #10.

4.3.3.1 Débits volumiques d'eau mesurés

Les mesures de débit d'eau prises à la sortie de l'échangeur de chaleur de l'ATC2, de l'ATC3 et à l'entrée des trois ATC sont montrées sur la Figure 4.13. Cette figure montre que les débits ont été relativement constants durant cette période. On remarque aussi que le débit total d'eau qui alimente les trois ATC est similaire d'une journée à l'autre. Utiliser la valeur moyenne de débit de chaque ATC et la considérer constante ne devrait donc pas avoir d'impact majeur sur les puissances thermiques calculées.

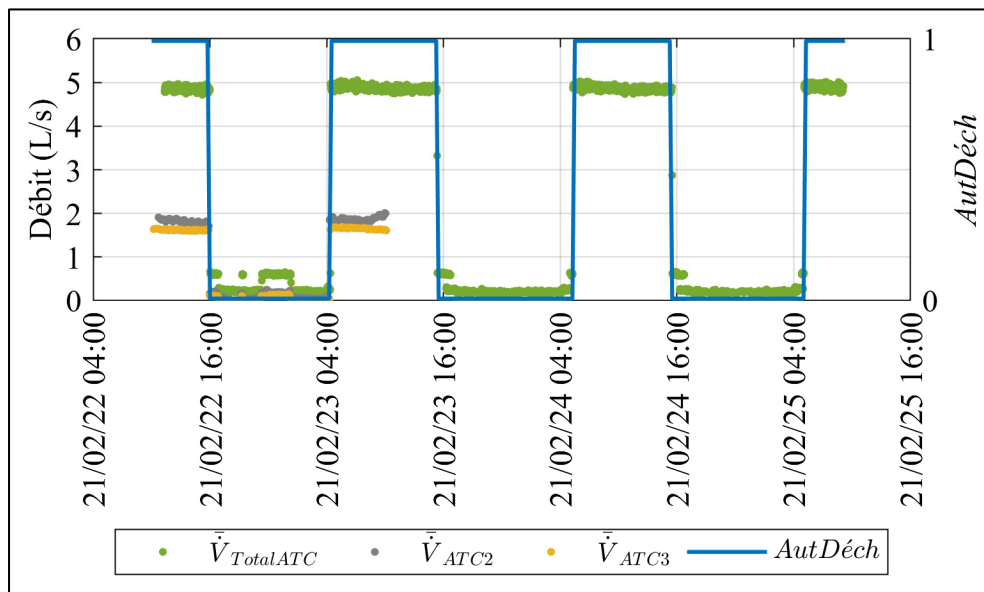


Figure 4.13 Débits d'eau mesurés et autorisations de décharge des ATC

La Figure 4.13 confirme qu'il y a un entrebarrage entre l'autorisation de décharge (*AutDéch*) et l'activation des pompes. Ainsi, la consigne d'autorisation de décharge permet de pallier les données non disponibles sur l'état des pompes identifiées au paragraphe 4.2.1.2. Lorsque la décharge n'était pas autorisée (c.-à-d. $AutDéch = 0$), les débits mesurés n'étaient pas strictement nuls : en moyenne, ils valaient 0,09 L/s (ATC2), 0,03 L/s (ATC3) et 0,20 L/s (Total ATC). Ces débits sont nettement inférieurs à ceux mesurés lorsque la décharge était autorisée (c.-à-d. $AutDéch = 1$), ne représentant qu'entre 2 et 5% de ces derniers. Les débits d'eau sont donc considérés nuls lorsque la décharge n'est pas autorisée.

Le Tableau 4.9 présente les débits moyens de chaque ATC, lorsque l'autorisation de décharge est active. Les écart-types, les valeurs minimales et maximales des mesures sont indiqués. Les écart-types sont comparables aux incertitudes de mesure des débitmètres à ultrasons, typiquement considérées entre 1 et 5% de la valeur lue, telles que relevées dans la sous-section 1.3.1.

Tableau 4.9 Débits d'eau moyens des ATC du site #10 (lorsque $AutDéch = 1$)

ATC	Débit moy. (L/s)	Écart-type (L/s) [%Débit moy.]	Valeur min. mesurée (L/s)	Valeur max. mesurée (L/s)
ATC1*	1,39	s. o.	s. o.	s. o.
ATC2	1,84	0,06 [3%]	1,70	2,01
ATC3	1,64	0,02 [1%]	1,60	1,68
Total ATC	4,87	0,05 [1%]	4,72	5,06

*Débit calculé par bilan de masse, tel qu'expliqué au paragraphe 4.2.3.1.

Les écarts entre les débits moyens de chaque ATC sont notables. Cet écart est de 0,45 L/s et de 0,20 L/s respectivement pour l'ATC1 et l'ATC3 par rapport à l'ATC2, dont le débit est le plus élevé (1,84 L/s). La Figure 4.13 indique clairement qu'il y a un écart entre les débits mesurés à la sortie de l'ATC2 et de l'ATC3. Cet écart n'a donc pas été induit par le calcul d'une valeur moyenne. Le débit spécifié dans les plans mécaniques du site #10 est de 27 USGPM, soit 1,70 L/s. Les débits moyens des ATC1 et 3 sont donc inférieurs à cette valeur attendue, avec des écarts respectifs de 18% et de 4%. Le débit moyen calculé de l'ATC2 est quant à lui supérieur de 8% à la valeur attendue. Ces écarts témoignent de **l'importance d'évaluer in situ les débits d'eau** pour quantifier la puissance et l'énergie thermique fournies.

4.3.3.2 Puissance et énergie thermique fournies

La puissance thermique fournie par chaque ATC est calculée en utilisant les valeurs moyennes de débits d'eau. Le Tableau 4.10 présente les valeurs mensuelles maximales et moyennes de puissances thermiques fournies durant la période d'hiver. L'Annexe VII présente l'incertitude sur la puissance thermique fournie évaluée en moyenne à ± 4 kW, ± 5 kW et ± 5 kW respectivement pour l'ATC1, l'ATC2 et l'ATC3. On remarque que les valeurs moyennes de l'ATC2 sont supérieures à celles des ATC1 et 3. La puissance thermique fournie dépend principalement du débit d'eau, du débit d'air circulant dans l'ATC et de la température des briques. La température de l'eau à l'entrée de l'échangeur influence aussi la puissance thermique fournie, mais en admettant qu'elle est la même pour les trois ATC, elle n'explique pas qu'un ATC fournisse une puissance plus ou moins élevée qu'un autre. Au cours d'une **même** décharge, l'écart entre la puissance maximale et moyenne fournie vient de la variation de la température des briques. La Figure 1.6 présentée au paragraphe 1.2.2.5 a montré la décroissance exponentielle de la puissance fournie lorsqu'un certain seuil d'énergie stockée est atteint (c.-à-d. une température de briques donnée).

Tableau 4.10 Puissances thermiques maximales et moyennes fournies par les ATC

Mois	Puissance thermique max. / moy. (kW)		
	ATC1	ATC2	ATC3
Décembre	71,6 / 26,1	91,0 / 33,5	79,8 / 30,9
Janvier	65,4 / 20,8	85,8 / 36,6	75,8 / 33,2
Février	68,2 / 30,4	89,5 / 36,6	79,8 / 33,6
Mars	69,9 / 32,2	97,8 / 38,6	87,2 / 35,3
Tous	71,6 / 27,0	97,8 / 36,6	87,2 / 33,5

La Figure 4.14 et la Figure 4.15 montrent respectivement la distribution de la vitesse commandée au moteur du ventilateur et la distribution de la température moyenne des briques de chaque ATC pendant la période d'hiver. La Figure 4.14 inclut uniquement les vitesses commandées non nulles, donc lorsque les ATC se déchargent. La distribution de la vitesse commandée est similaire pour les trois ATC, ce qui est cohérent avec une même température de l'eau à l'entrée et une même consigne de température en sortie. La Figure 4.15 montre quant à elle que la température moyenne des briques de l'ATC1 est plus fréquemment à plus haute

température (450 à 650°C) que les ATC2 et 3. Pourtant, l'ATC2 fournit en moyenne une puissance plus élevée que l'ATC1. Les résultats du Tableau 4.10 et ces histogrammes indiquent que le débit d'eau est le principal paramètre expliquant ces écarts entre les puissances fournies par les trois ATC. Les débits d'eau mesurés concordent avec ce constat, puisque le débit de 1,84 L/s pour l'ATC2 est le plus élevé et celui de 1,39 L/s pour l'ATC1 est le plus faible.

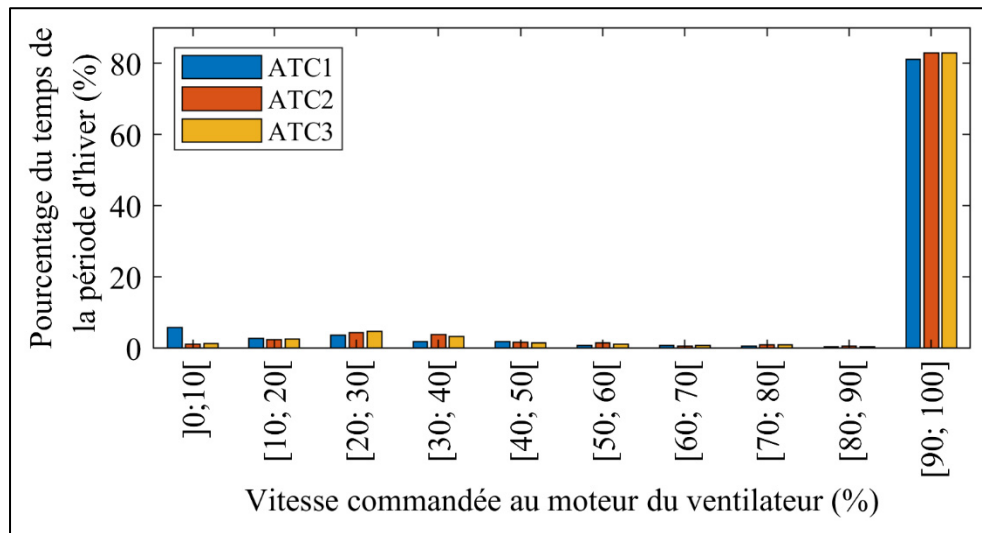


Figure 4.14 Distribution de la vitesse commandée au moteur du ventilateur

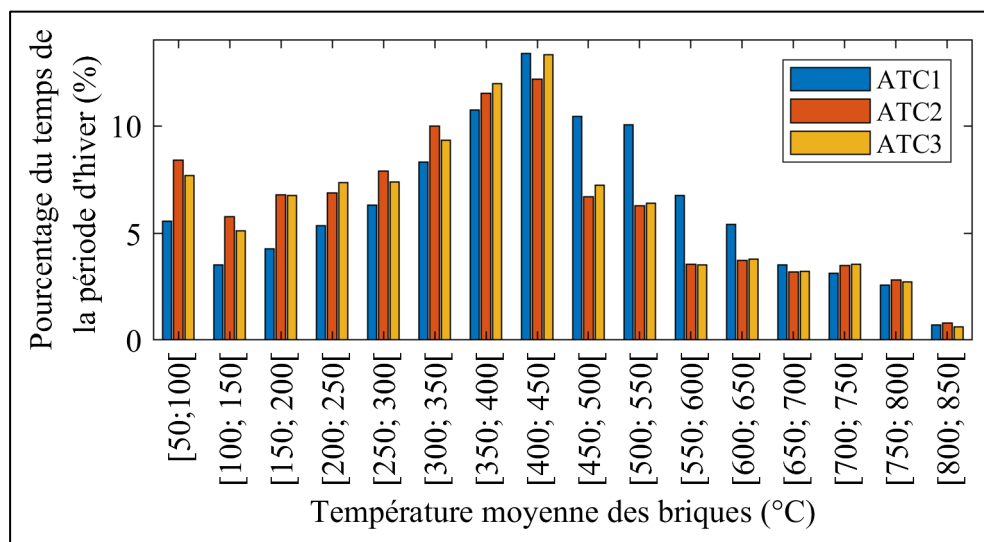


Figure 4.15 Distribution de la température moyenne des briques

Le Tableau 4.11 montre les résultats des calculs de l'énergie thermique fournie mensuellement par les ATC.²⁹ L'énergie fournie pendant les mois de décembre et janvier est moindre qu'en février et mars. Il faut rappeler que les données de température des briques des ATC2 et 3, requises pour valider par bilan d'énergie les puissances calculées, ne sont pas disponibles entre le 22 décembre 2020 et le 7 janvier 2021, tel que mentionné dans la sous-section 4.3.1. Cette période n'est donc pas incluse dans le Tableau 4.11 pour ces deux ATC. Malgré ces données manquantes, s'étalant sur 17 des 62 jours de décembre et janvier (27%), l'impact sur les résultats présentés dans le Tableau 4.11 est négligeable puisque les trois ATC n'ont pas eu l'autorisation de se décharger durant la majeure partie de cette période, soit entre le 22 décembre et le 6 janvier. L'énergie fournie par l'ATC1 durant cette période, qui a pu être quantifiée et incluse dans le Tableau 4.11, totalise uniquement 41 kWh. La plus faible quantité d'énergie fournie pendant les deux premiers mois de l'hiver est donc vraisemblablement due à l'utilisation moins marquée des ATC (c.-à-d. décharge non autorisée), plutôt qu'aux données manquantes. Comme cette période coïncide avec le congé des Fêtes de fin d'année, un moment d'inoccupation prolongé d'un bâtiment scolaire, l'autorisation de décharge a pu être désactivée temporairement, puisque les besoins de chauffage sont réduits.

Tableau 4.11 Énergie thermique fournie par les ATC durant la période d'hiver

Énergie thermique fournie (kWh)	ATC1	ATC2	ATC3	Total ATC
Décembre	3 030	4 010	3 700	10 740
Janvier	5 070	4 370	3 970	13 410
Février	6 010	7 290	6 700	20 000
Mars	5 730	6 950	6 370	19 050
Total	19 900	22 600	20 700	63 200

Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs.

En dénombrant les décharges ayant eu lieu durant la période d'hiver, en ayant quantifié l'énergie **totale** fournie et la puissance moyenne, on peut estimer la durée moyenne de décharge. Le Tableau 4.12 présente cette estimation. La durée moyenne de décharge entre 9 et

²⁹ À titre indicatif, le nombre de degrés-jours de chauffage (DJc₁₈) pendant la période d'hiver calculés avec les données de température extérieure est de 2 657. Pour cette même période, le nombre de degrés-jours normalisés tiré d'Hélios pour la station météorologique à proximité est de 2 940, donc 9,6% plus élevé. Ces valeurs peuvent servir à estimer l'énergie fournie durant un hiver « normal », ou pour une autre localisation que celle du site #10.

10 h et la puissance moyenne fournie entre 27,0 et 36,6 kW fournissent des ordres de grandeur utiles pour faciliter la conception préliminaire discutée au Chapitre 3, en admettant que : la vitesse commandée au moteur du ventilateur soit comprise entre 90 et 100% et que la température moyenne des briques avant la décharge soit entre 565 et 585°C. La dernière ligne du Tableau 4.12 indique la température moyenne des briques après la décharge. À une température entre 113 et 216°C, le transfert de chaleur entre les briques, l'air à l'intérieur de l'ATC et l'eau dans l'échangeur est limité. Les décharges exploitent donc la majeure partie de l'énergie stockée. Des décharges se terminant avec des températures plus élevées indiqueraient que de l'énergie stockée est inutilisée et ultimement libérée dans l'air ambiant de la chaufferie. La température moyenne des briques à la fin de la décharge de l'ATC1 de 216°C est plus élevée que celle des deux autres ATC, ce qui concorde avec le fait qu'il ait fourni moins d'énergie.

Tableau 4.12 Durée moyenne de décharge et température finale des briques des ATC

Valeurs moyennes pour la période d'hiver	ATC1	ATC2	ATC3
Énergie thermique totale fournie (kWh)	19 853	22 622	20 727
Nombre total de décharges	74	68	68
Énergie thermique fournie en moy. par décharge (kWh)	268	332	305
Puissance moy. de décharge (kW)	27,0	36,6	33,5
Temps moy. de décharge (h)	10	9	9
Température moy. des briques avant la décharge (°C)	565	585	584
Température moy. des briques après la décharge (°C)	216	113	122

4.3.3.3 Puissance appelée et énergie électrique consommée

Le Tableau 4.13 présente la consommation mensuelle et saisonnière d'électricité pour la charge des ATC. Évidemment, les consommations sont plus élevées durant les mois de février et mars, puisque ce sont ces mois où les ATC ont fourni plus d'énergie thermique (voir Tableau 4.11). La consommation mensuelle d'électricité de l'ATC1 est plus faible que celle des autres ATC, ce qui est cohérent avec le fait qu'il ait fourni moins d'énergie thermique.

Une remarque similaire à celle des résultats présentés dans le Tableau 4.11 s'applique à ceux présentés dans le Tableau 4.13, c'est-à-dire que les 1 100 kWh d'électricité consommés par l'ATC1 entre le 22 décembre et le 7 janvier sont inclus dans le Tableau 4.13, alors que l'électricité consommée par les ATC2 et 3 n'a pas pu être quantifiée pendant cette période. Il

n'a pas été possible de confirmer si les ATC2 et 3 ont été chargés durant cette période, n'ayant pas les températures mesurées des briques. Ces 1 100 kWh représentent 10,8% de l'énergie consommée par l'ATC1 en décembre et en janvier, alors que seulement 41 kWh d'énergie thermique ont été fournis durant cette même période, soit 3,7% des 1 100 kWh consommés. Ces quantités d'énergie sont relativement faibles par rapport à la consommation d'énergie saisonnière de l'ATC1 de 25 200 kWh (<5%), mais cela souligne l'importance de charger les ATC de manière conséquente avec les besoins thermiques à combler à court terme. Ultimement, l'électricité consommée pour charger les ATC qui n'est pas délivrée au réseau de chauffage sera libérée dans l'air ambiant de la chaufferie, engendrant des pertes thermiques.

Tableau 4.13 Énergie électrique consommée par les ATC durant la période d'hiver

Énergie électrique consommée (kWh)	ATC1	ATC2	ATC3	Total ATC
Décembre	4 630	4 680	4 900	14 200
Janvier	5 530	5 560	5 780	16 870
Février	7 540	8 350	8 770	24 660
Mars	7 520	8 320	8 790	24 630
Total	25 200	26 900	28 300	80 400

Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs.

4.3.3.4 Pertes thermiques

La Figure 4.16 a) montre la température moyenne des briques de l'ATC1, les points verts, durant une période d'attente entre le 18 et le 20 décembre 2020. La droite tiretée noire relie la température moyenne au début de cette période (562°C) et celle à la fin (375°C). En comparant les températures moyennes à la droite tiretée, on dénote une décroissance d'abord exponentielle, puis presque linéaire dans les dix dernières heures de la période d'attente. C'est l'évolution attendue pour utiliser le modèle *Lumped Capacitance*.

La Figure 4.16 b) montre, pour cette même période d'attente, les températures moyennes linéarisées avec l'équation (4.10). La droite noire montre la régression linéaire passant par l'origine, dont l'inverse de la pente correspond à la constante de temps τ qui vaut dans ce cas-ci 95,28 h. Cette constante de temps, multipliée par la masse et la capacité thermique massique

des briques, résulte en un coefficient $(UA)_{effectif}$ de 6,28 W/K. Les indicateurs statistiques NMBE et CV(RMSE) sont calculés et rencontrent les critères fixés.

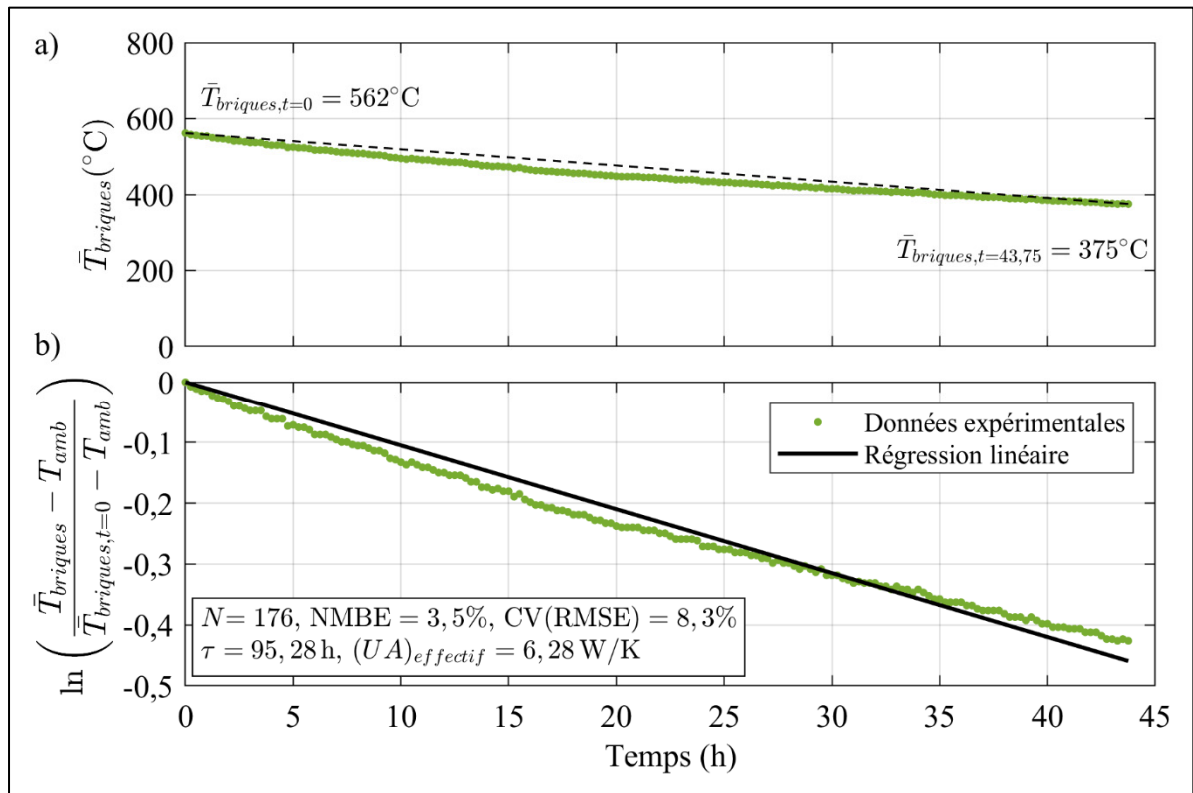


Figure 4.16 Évolution de la température moyenne des briques pendant une période d'attente et régression linéaire

Le coefficient de déperditions thermiques effectif est calculé pour chaque période d'attente. Le Tableau 4.14 présente les valeurs minimales, maximales et moyennes calculées pour chaque ATC. Un total de 87 périodes d'attente répondent aux critères établis au paragraphe 4.2.3.4, dont 41 périodes pour l'ATC1, 21 périodes pour l'ATC2 et 25 périodes pour l'ATC3. Les valeurs moyennes sont des moyennes arithmétiques. Elles ne tiennent donc pas compte de la durée des périodes d'attente sur la valeur du coefficient dont l'impact est discuté à l'Annexe VIII. Les valeurs moyennes des trois ATC sont similaires, en considérant que les écart-types sont d'environ 3 W/K.

Tableau 4.14 Coefficients de déperditions thermiques effectifs calculés

$(UA)_{\text{effectif}}$ (W/K)	ATC1	ATC2	ATC3
Valeur minimale calculée	3,93	3,86	3,85
Valeur maximale calculée	20,7	16,3	16,5
Valeur moyenne calculée	6,83	7,89	7,64
Écart-type	3,44	3,13	3,33
Valeur utilisée après la calibration par bilan d'énergie	6,10	7,30	7,20

La Figure 4.17 montre la distribution du coefficient de déperditions thermiques effectif de chaque ATC. On remarque qu'un total de 13 périodes d'attente sur 87 (14,9%) résultent en un coefficient supérieur à 7,5 W/K, alors que les autres valeurs sont concentrées dans les plages plus proches du coefficient moyen. Ces valeurs supérieures à 7,5 W/K portent légèrement à la hausse les moyennes présentées dans le Tableau 4.14 par rapport aux valeurs les plus fréquentes. Il est à noter que la plupart des valeurs de UA_{effectif} comprises entre 11,5 et 17,5 W/K correspondent aux mêmes périodes d'attente : des vendredis aux mois de mars et d'avril à des heures où le bâtiment est occupé. Il pourrait y avoir eu des interventions dans la salle mécanique (p. ex. l'ouverture de la porte de garage) faisant chuter la température ambiante et augmentant momentanément les déperditions thermiques. L'Annexe VIII présente les résultats détaillés des coefficients de déperditions thermiques effectifs calculés pour ces périodes.

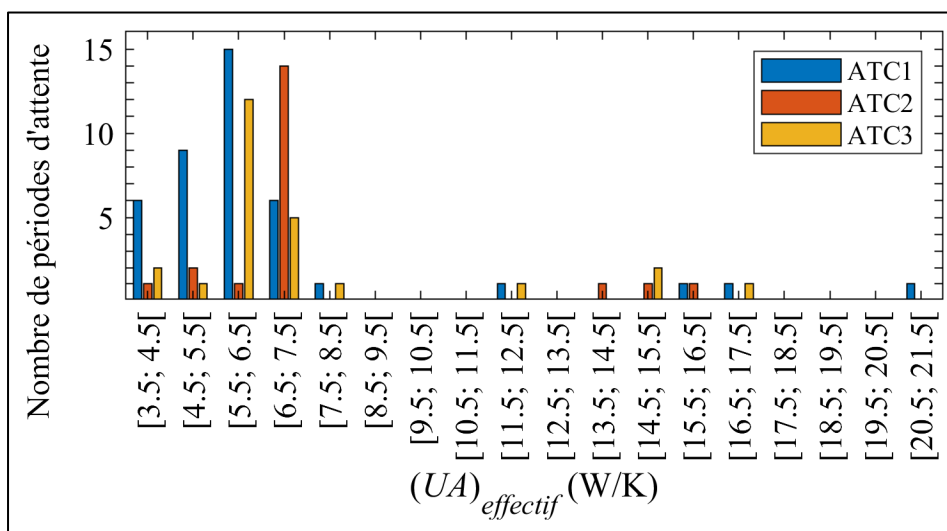


Figure 4.17 Distribution du coefficient de déperditions thermiques effectif

Les valeurs du coefficient de déperditions thermiques effectif indiquées à la dernière ligne du Tableau 4.14 ont été établies en effectuant la calibration par bilan d'énergie, dont les résultats sont présentés au paragraphe 4.3.3.5 qui suit. Ces valeurs calibrées ont été utilisées pour quantifier les pertes thermiques présentées dans le Tableau 4.15. Les valeurs calibrées des ATC1 et 2, respectivement de 6,1 et de 7,3 W/K, sont comprises dans les intervalles les plus fréquents, tel que montré par la Figure 4.17. Pour l'ATC3, la valeur calibrée de 7,2 W/K est comprise dans le 2^e intervalle le plus fréquent. Utiliser un coefficient moyen, constant et relativement proche de la valeur saisonnière la plus fréquente est cohérent avec l'objectif de quantifier la performance énergétique des ATC au cours d'une saison d'opération.

Tableau 4.15 Pertes thermiques des ATC durant la période d'hiver

Pertes thermiques (kWh)	ATC1	ATC2	ATC3	Total ATC
Décembre	1 790	1 140	1 140	4 060
Janvier	1 680	1 310	1 320	4 300
Février	1 640	1 870	1 870	5 380
Mars	1 780	2 040	2 030	5 840
Total	6 880	6 360	6 350	19 590
Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs.				

Les ATC2 et 3, qui ont des coefficients de déperditions thermiques effectifs moyens et une distribution de température des briques similaires (voir Figure 4.15) ont approximativement les mêmes pertes thermiques mensuelles. Les pertes de l'ATC1 durant les mois de décembre et janvier sont supérieures d'environ 1 000 kWh par rapport aux deux autres ATC, malgré que cet ATC a un coefficient de déperditions thermiques effectif moyen plus faible. Cela est attribuable au fait que seules les pertes thermiques de l'ATC1 ont pu être quantifiées entre le 22 décembre et le 7 janvier, puisque les données de température des briques des deux autres ATC ne sont pas disponibles. Environ 90% des 1 100 kWh d'électricité consommée par l'ATC1 durant cette période ont donc été relâchés dans l'air ambiant de la chaufferie, plutôt que fournie au réseau de chauffage hydronique. Dans le même ordre d'idées, la Figure 4.11 a montré que les ATC sont chargés le vendredi après-midi sans être déchargés avant le lundi avant-midi suivant. Cela indique qu'une portion des pertes thermiques présentées au Tableau 4.15 aurait pu être évitée en chargeant les ATC plus tard au cours de la fin de semaine. Ces pertes ont été quantifiées et seront présentées au paragraphe 4.3.3.7.

4.3.3.5 Bilans d'énergie

Les bilans d'énergie 1 à 3 décrits au paragraphe 4.2.3.5 ont été utilisés pour assurer la cohérence des calculs de puissance thermique fournie, de puissance électrique appelée et des pertes thermiques instantanées de chaque ATC durant la période d'analyse et ajuster certains paramètres. Le quatrième bilan d'énergie a permis de valider la cohérence des valeurs saisonnières d'énergie thermique fournie, d'énergie électrique consommée et de pertes thermiques. Les conclusions de chacun de ces bilans d'énergie sont présentées ci-après.

Le bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en attente (bilan 1) a été utilisé pour calibrer le coefficient de déperditions thermiques moyen. Les valeurs calibrées de coefficients ont été présentées dans le Tableau 4.14.

Le bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en charge (bilan 2) a été calculé en supposant que tous les éléments chauffants de l'ATC sont fonctionnels. Il n'y a aucun indice évident que certains éléments chauffants seraient défectueux.

Le bilan d'énergie à chaque instant pendant lequel l'ATC est en décharge (bilan 3) a été calculé en utilisant les valeurs de débit volumique, de densité et de capacité thermique massique de l'eau présentées aux paragraphes 4.2.3.2 et 4.3.3.1. La Figure 4.18 montre la distribution des valeurs en kW du bilan 3 avant et après la calibration. Les histogrammes avant la calibration montrent un décalage net vers les valeurs positives, alors que ceux après la calibration sont centrés autour d'une valeur nulle. Le bilan après calibration a été obtenu en utilisant la température mesurée à la sortie de l'échangeur de chaleur de l'ATC ($T_{out,éch}$) pour calculer la puissance thermique fournie, alors que celui avant calibration a été obtenu en utilisant la température $T_{out,ATCn}$ mesurée plus en aval sur la tuyauterie (voir Figure 4.2). Ainsi, le bilan d'énergie en décharge des trois ATC du site #10 est plus centré autour d'une valeur nulle en utilisant $T_{out,éch}$ pour quantifier la puissance thermique fournie qu'en utilisant $T_{out,ATCn}$.

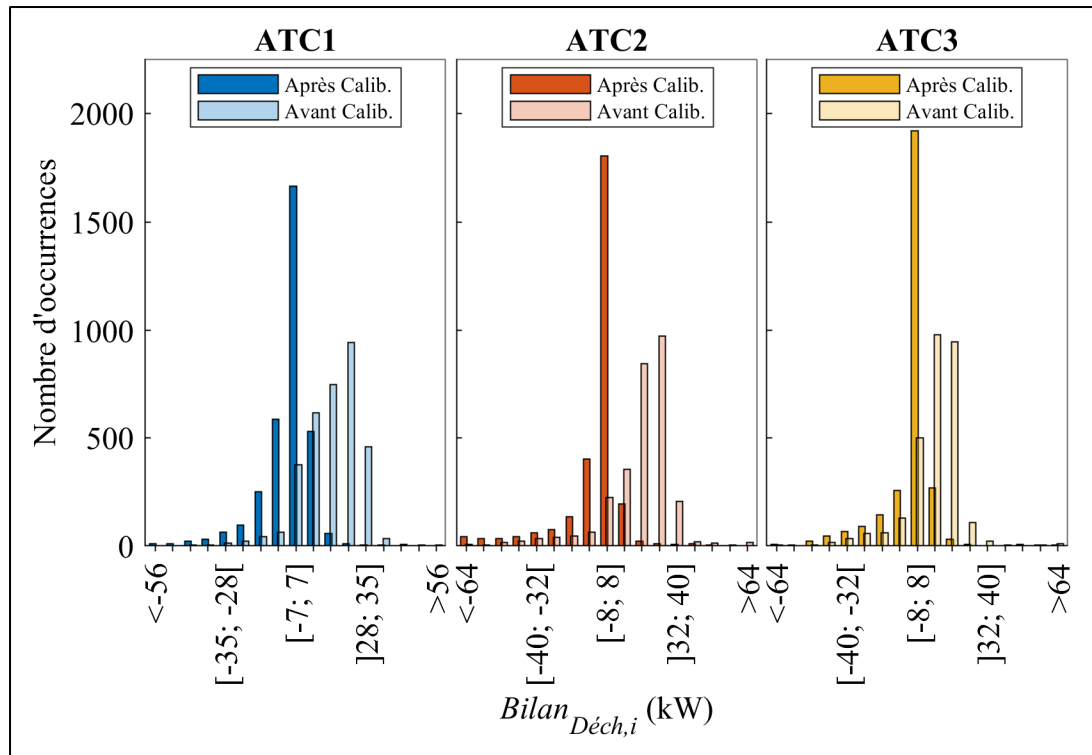


Figure 4.18 Distribution du bilan d'énergie des ATC en décharge avant et après calibration

Le bilan d'énergie saisonnier (bilan 4) est calculé pour la période d'hiver. Le Tableau 4.16 présente le calcul de ce bilan, qui varie entre +4% et -8% de l'énergie électrique consommée par les ATC. Ce bilan est jugé acceptable par rapport à son incertitude qui a été évaluée à ± 400 kWh (voir Annexe VII).

Tableau 4.16 Bilan d'énergie saisonnier des ATC pour la période d'hiver

ATC	ATC1	ATC2	ATC3
Énergie thermique fournie (kWh)	19 853	22 622	20 727
Énergie électrique consommée (kWh)	25 222	26 906	28 233
Pertes thermiques (kWh)	6 876	6 359	6 353
Variation d'énergie stockée, entre début et fin de l'hiver (kWh)	101	105	104
Bilan d'énergie saisonnier (kWh)	-1 608	-2 180	1 049
Bilan d'énergie saisonnier/Énergie électrique consommée (%)	-6%	-8%	+4%

4.3.3.6 Rendement énergétique

Le Tableau 4.17 présente les rendements énergétiques saisonniers des ATC qui varient entre 73% (ATC3) et 84% (ATC2). Le complément au rendement maximal de 100% est principalement les pertes thermiques saisonnières et, d'une moins grande ampleur, la variation d'énergie stockée entre le début et la fin de la période d'hiver. L'incertitude sur le rendement a été évaluée à $\pm 1\%$ (voir Annexe VII).

Tableau 4.17 Rendements énergétiques saisonniers des ATC

ATC	ATC1	ATC2	ATC3
Énergie thermique fournie (kWh)	19 853	22 622	20 727
Énergie électrique consommée (kWh)	25 222	26 906	28 233
Rendement énergétique saisonnier (%)	79%	84%	73%

4.3.3.7 Analyse de la performance énergétique et pistes d'amélioration

Les résultats qui ont été présentés dans cette sous-section montrent que les ATC du site #10 ont une performance énergétique notable. En tenant compte de leur utilisation comme équipement de gestion de pointe, ils ont fourni une puissance et une énergie thermiques considérables durant la période d'hiver, avec un rendement énergétique moyen de 79%. Aussi, les résultats mensuels montrent que leur performance a été assez constante tout au long de l'hiver. Pour cette utilisation précise, dans un bâtiment avec un profil de puissance appelée récurrent (c.-à-d. prévisible) et qui présente des variations journalières de plus de 300 kW sur un appel maximal d'environ 1 100 kW (voir Figure 4.12), le contrôle actuel des ATC est plutôt simple, puisqu'essentiellement basé sur un horaire pour autoriser la charge et la décharge. En contrepartie, le profil de puissance appelée du bâtiment laisse peu de puissance disponible pour charger les ATC durant la période occupée, ce qui limite le nombre de cycles de charge et de décharge journaliers. Il faudrait par exemple augmenter la consigne de température des briques et pouvoir abaisser la température d'opération du réseau de chauffage pour augmenter leur contribution énergétique lors de la décharge journalière. Ces ajustements seraient simples à mettre en œuvre, mais peuvent mener à des enjeux d'opération et de maintenance qui ont été discutés au Chapitre 3. Il faudrait donc évaluer plus en détail leurs implications avant de procéder à de tels ajustements.

Néanmoins, la Figure 4.11 qui a été présentée dans la sous-section précédente montre que les ATC sont chargés le vendredi en fin de journée, entre 16 h et 20 h, alors que la décharge n'est pas autorisée avant le lundi suivant. Autrement dit, une portion de l'électricité consommée les vendredis est libérée dans l'air ambiant durant la fin de semaine, ce qui contribue aux pertes thermiques calculées et diminue le rendement énergétique. Le Tableau 4.18 indique que dans le cas actuel, entre 60% et 70% de l'électricité consommée les vendredis après 16 h est convertie en pertes thermiques au cours de la fin de semaine. Il n'y a ainsi qu'entre 30% et 40% de cette énergie consommée qui demeure stockée dans les briques le dimanche à 16 h. Ces pertes entre le vendredi 16 h et le dimanche 16 h représentent environ le quart (23-24%) des pertes thermiques totales de la période d'hiver. Une piste d'amélioration de la performance énergétique, simple à mettre en place, serait donc de modifier l'autorisation de charge.

Tableau 4.18 Estimation de l'impact de modifier l'autorisation de charge des ATC sur les pertes thermiques et les rendements énergétiques saisonniers

ATC		ATC1	ATC2	ATC3	Tous
Cas actuel : Charge le Ven. entre 16 h et 20 h					
Entre Ven. 16 h et Dim. 16 h	Énergie élec. consommée (kWh)	2 338	2 427	2 487	7 253
	Pertes thermiques (kWh)	1 628	1 447	1 466	4 541
Pertes thermiques totales période d'hiver (kWh)		6 880	6 360	6 350	19 590
Ratio Pertes Ven.-Dim. / Énergie élec. Ven.-Dim.		70%	60%	59%	63%
Ratio Pertes Ven.-Dim. / Pertes thermiques totales		24%	23%	23%	23%
Cas proposé : Charge non autorisée après la décharge du Ven., jusqu'au Dim. 16 h					
Entre Ven. 16 h et Dim. 16 h	Énergie élec. consommée (kWh)	0	0	0	0
	Pertes thermiques (kWh)*	763	360	392	1 515
Pertes thermiques totales période d'hiver (kWh)**		6 020	5 270	5 280	16 560
Énergie élec. consommée période d'hiver (kWh)***		24 360	25 820	27 160	77 340
Énergie thermique fournie période d'hiver (kWh)****		19 900	22 600	20 700	63 200
Rendement énergétique saisonnier		82%	88%	76%	82%
Estimation : réduction des pertes thermiques totales		-13%	-17%	-17%	-15%
Estimation : amélioration du rendement énergétique		+3%	+4%	+3%	+3%
Les valeurs saisonnières (c.-à-d. pour toute la période d'hiver) ont été arrondies.					
*Estimation à partir des températures moy. des briques à la fin de la décharge indiquées au Tableau 4.12 et des coefficients calibrés de déperditions thermiques effectifs indiqués au Tableau 4.14.					
**Estimation en soustrayant les pertes se produisant entre le Ven. et le Dim. dans le cas actuel (1 628 kWh pour l'ATC1) et en additionnant celles qui se produiraient dans le cas proposé (763 kWh) aux pertes thermiques totales du cas actuel (6 880 kWh).					
***Estimation en soustrayant la consommation d'élec. entre le Ven. et le Dim. dans le cas actuel (2 338 kWh pour l'ATC1) et en additionnant l'énergie qui demeure stockée le Dim. à 16 h dans le cas actuel (2 338 kWh - 1 628 kWh = 710 kWh) et l'énergie à stocker pour compenser les pertes thermiques du cas proposé (763 kWh) de la consommation actuelle d'élec. indiquée au Tableau 4.13 (25 200 kWh).					
****Valeurs tirées du Tableau 4.11. L'énergie thermique fournie est donc la même.					

La Figure 4.12 a montré que la puissance appelée le dimanche est inférieure à celle des jours de la semaine, ce qui permettrait de repousser la charge actuelle du vendredi en fin de journée au dimanche à partir de 16 h, heure à laquelle la charge est actuellement autorisée. La puissance et le temps requis pour charger les ATC le dimanche seraient nécessairement différents de ceux du cas actuel, mais l'analyse des données de puissance appelée du bâtiment n'a pas identifié d'enjeu particulier associé à ce changement. La consigne de température des briques demeurerait inchangée; il n'y aurait donc pas d'impact sur la décharge des ATC. L'énergie thermique fournie serait la même que dans le cas actuel.

La température des briques étant en moyenne entre 113°C et 216°C à la fin de la décharge, il y aurait inévitablement des pertes thermiques au cours de la fin de semaine, mais elles seraient moindres. Le Tableau 4.18 présente une estimation des pertes qui se produiraient en modifiant l'autorisation de charge des ATC (c.-à-d. le cas proposé). Les pertes thermiques totales de la période d'hiver pourraient être réduites de 15%, ce qui augmenterait le rendement énergétique moyen des ATC de 3%, et ce, tout en comblant les mêmes besoins de chauffage. Dans cette estimation, il a été admis que les pertes qui se produiraient à compter de 16 h le dimanche seraient les mêmes que celles du cas actuel. La température des briques au début de la charge serait en fait plus basse que dans le cas actuel, réduisant les pertes à ce moment. La puissance et le temps de charge permettant d'atteindre la même température finale des briques impacteraient aussi les pertes, ce qui a été négligé.

Cette piste d'amélioration réitère que l'opération de l'ATC doit viser à combler des besoins thermiques à court terme. Les séquences de contrôle doivent éviter de le charger avant une période prolongée (>2 jours) sans besoin anticipé, ce qui rejoint une bonne pratique énoncée au Chapitre 3. Les coefficients de déperditions thermiques effectifs présentés dans le Tableau 4.14 peuvent servir à estimer les pertes lors de la conception et à élaborer des séquences. L'Annexe X, qui sera introduite au Chapitre 5, propose un gabarit de bilan d'énergie permettant entre autres de quantifier les pertes thermiques. Enfin, une autre piste qui devrait être considérée pour réduire les pertes serait de décaler le début de la charge journalière, afin qu'elle se termine le plus près possible du début de la décharge qui suit.

4.3.4 Scénario de substitution

Cette sous-section présente, aux paragraphes 4.3.4.1 à 4.3.4.4 qui suivent, les résultats du scénario de substitution, dénommé « biénergie », ayant permis de quantifier l'impact des ATC sur la puissance appelée du bâtiment, sur la consommation d'électricité, de combustible et d'énergie, sur les coûts énergétiques et sur les émissions de GES. Le paragraphe 4.3.4.5 termine cette sous-section par une analyse des résultats du scénario de substitution.

4.3.4.1 Puissance appelée du bâtiment

Le Tableau 4.19 présente les puissances de délestage mensuelles du bâtiment. Pour les mois de décembre, février et mars, deux puissances de délestage ont été utilisées. Les pourcentages entre parenthèses indiquent la fraction du mois pendant laquelle chaque puissance de délestage a été utilisée. Les puissances maximales appelées de chaque mois (P_{max}) sont les mêmes pour le scénario avec ATC et le scénario de substitution (Subst.), tandis que les facteurs d'utilisation (FU) du scénario avec ATC sont de 2 à 3% supérieurs à ceux du scénario de substitution. Cela indique que les ATC sont chargés durant les périodes creuses de demande du bâtiment, tel qu'illustré par les points orange sur la Figure 4.19 qui représentent la puissance totale appelée par les trois ATC de la journée du 16 décembre 2020. L'écart entre les points noirs et les croix bleues sur la Figure 4.19 montre le nivelage de la puissance appelée avec les ATC. Pour tous les mois, les puissances de délestage ont été dépassées d'entre 13 et 34 kW, soit au maximum 3% de la puissance de délestage visée.

Tableau 4.19 Puissances maximales appelées et facteurs d'utilisation mensuels de chaque scénario

Mois	$P_{délestage,bât}$ (kW)	P_{max} (kW)		FU (%)	
		ATC	Subst.	ATC	Subst.
Déc.	925 (1%) ; 1 100 (99%)	1 134	1 134	59	57
Janv.	1 100 (100%)	1 130	1 130	68	66
Fév.	1 080 (48%) ; 1 100 (52%)	1 114	1 114	73	70
Mars	850 (13%) ; 1 080 (87%)	1 093	1 093	71	68

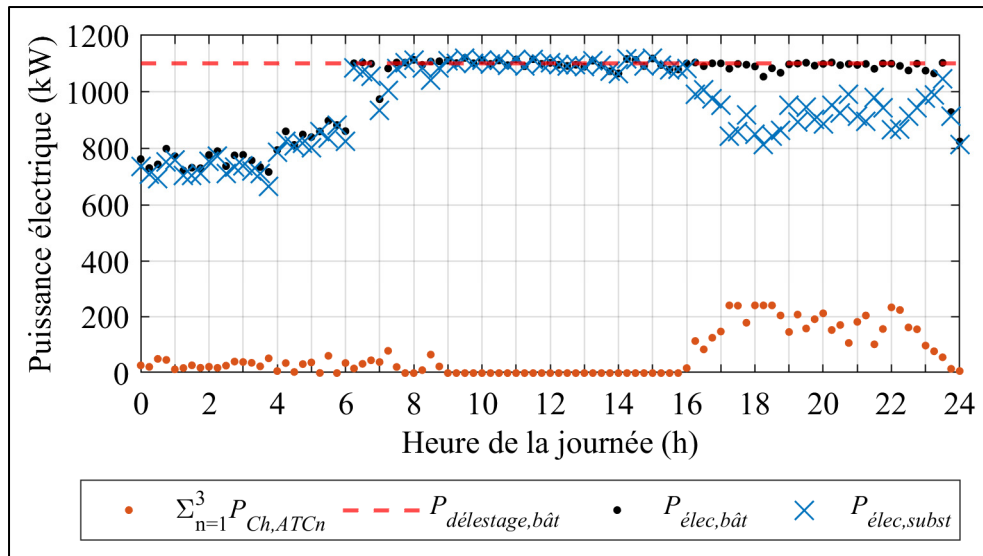


Figure 4.19 Profil de puissance appelée du bâtiment avec et sans ATC

4.3.4.2 Consommation d'électricité, de combustible et totale d'énergie

Le Tableau 4.20 présente les consommations mensuelles d'énergie électrique, de gaz naturel et totale du scénario avec ATC et du scénario de substitution. Les colonnes « Diff. » indiquent les différences entre les consommations d'énergie des deux scénarios. Le scénario avec ATC mène évidemment à une consommation d'électricité plus élevée que le scénario de substitution et à une consommation de gaz naturel moindre. L'électricité supplémentaire consommée dans le scénario avec ATC, 80,4 MWh, correspond à l'énergie consommée pour la charge des ATC. La consommation de gaz naturel évitée de 76,1 MWh_{éq} correspond quant à elle à l'énergie thermique fournie par les ATC divisée par le rendement de la chaudière (η_{comb}) de 83%. En combinant la consommation supplémentaire d'électricité et la consommation de gaz naturel évitée, l'énergie totale consommée selon le scénario avec ATC est plus élevée de 4,4 MWh_{éq} par rapport au scénario de substitution. Cette augmentation nette de la consommation totale d'énergie est faible par rapport à la consommation de gaz naturel évitée de 76,1 MWh_{éq} (~6%). Cette augmentation est attribuable au rendement énergétique moyen pondéré des ATC de 79% qui est inférieur de 4% par rapport au rendement de 83% considéré pour la chaudière au gaz naturel. En mettant en place les pistes d'amélioration qui ont été proposées au paragraphe 4.3.3.7 pour réduire les pertes thermiques des ATC, l'impact sur la consommation totale

d'énergie serait pratiquement nul. Le rendement énergétique estimé des ATC serait en effet semblable à celui de la chaudière.

Tableau 4.20 Consommations d'électricité, de gaz naturel et totale de chaque scénario

Mois	Électricité (MWh)			Gaz naturel (MWh _{éq}) [m ³]			Énergie totale (MWh _{éq})		
	ATC	Subst.	Diff.	ATC	Subst.	Diff.	ATC	Subst.	Diff.
Déc.	498,8	484,3	+14,2	9,9 [940]	22,8 [2 170]	-12,9 [-1 230]	508,7	507,1	+1,5
Janv.	572,4	555,5	+16,9	11,3 [1 080]	27,5 [2 610]	-16,2 [-1 540]	583,7	583,0	+0,7
Fév.	547,5	522,8	+24,7	27,5 [2 620]	51,6 [4 910]	-24,1 [-2 290]	575,0	574,5	+0,6
Mars	577,4	552,8	+24,6	15,31 [1 450]	38,3 [3 640]	-23,0 [-2 180]	592,8	591,1	+1,7
Total	2 196	2 116	+80,4	64,1 [6 090]	140,2 [13 320]	-76,1 [-7 240]	2 260	2 256	+4,4

Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs indiquées. Il en est de même pour les différences.

4.3.4.3 Coûts énergétiques

Le Tableau 4.21 présente les coûts d'électricité et de gaz naturel durant la période d'hiver pour chaque scénario. Les coûts d'électricité mensuels incluent le coût de l'appel maximal de puissance et de l'énergie consommée. Les colonnes « Diff. » indiquent les écarts entre les coûts du scénario avec ATC et ceux du scénario de substitution. Ces écarts sont conséquents avec les consommations d'énergie de chaque source : les coûts d'électricité sont plus élevés pour le scénario avec ATC que le scénario de substitution et les coûts de gaz naturel sont moindres. Le coût total d'énergie du scénario avec ATC pour la période d'hiver est plus élevé de 300\$ par rapport au scénario de substitution. Cette différence est marginale vis-à-vis du coût total d'énergie de chaque scénario. D'un point de vue économique, cela indique que le coût d'électricité lié à l'utilisation d'ATC comme équipement de gestion de pointe liée au chauffage est similaire à celui du gaz naturel. Il apparaît important de souligner que le coût total d'électricité du scénario de substitution, 157 000\$, est de loin supérieur au coût d'électricité de 3 100\$ pour charger les ATC. Environ 40% des coûts mensuels d'électricité sont attribuables à l'appel maximal de puissance de l'ordre de 1 100 kW au tarif de 14,77\$/kW, totalisant environ 16 250\$ par mois. En nivelant la demande sans augmenter l'appel maximal

mensuel de puissance, les ATC permettent d'éviter d'augmenter drastiquement les coûts d'électricité, tout en utilisant de la puissance disponible qui serait facturée de toute façon, même en utilisant une chaudière au gaz naturel plutôt que les ATC.

Tableau 4.21 Coûts d'électricité, de gaz naturel et totaux de chaque scénario

Mois	Coûts d'électricité : puissance max. appelée et énergie (\$)			Coûts de gaz naturel (\$)			Coûts totaux (\$)		
	ATC	Subst.	Diff.	ATC	Subst.	Diff.	ATC	Subst.	Diff.
Déc.	38 360	37 820	+540	360	820	-470	38 720	38 640	+80
Janv.	41 080	40 450	+640	410	990	-580	41 490	41 440	+50
Fév.	39 910	38 970	+930	1 000	1 870	-870	40 900	40 840	+60
Mars	40 730	39 800	+930	560	1 380	-830	41 280	41 180	+100
Total	160 100	157 000	+3 100	2 300	5 100	- 2 800	162 400	162 100	+300

Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs indiquées. Il en est de même pour les différences.

4.3.4.4 Émissions de GES

Les émissions de GES durant la période d'hiver sont de 15,1 tCO₂éq pour le scénario avec ATC et de 28,7 tCO₂éq pour le scénario de substitution. Comme indiqué dans le Tableau 4.22, l'utilisation des ATC mène à une réduction de 13,6 tCO₂éq, soit 47% des émissions de GES du scénario de substitution. Les ATC ont ainsi permis de réduire substantiellement les émissions de GES associées à la consommation de gaz naturel.

Tableau 4.22 Émissions de GES de chaque scénario

Mois	Émissions de GES (tCO ₂ éq)		
	ATC	Subst.	Diff.
Déc.	2,6	4,9	-2,3
Janv.	3,0	5,9	-2,9
Fév.	5,8	10,1	-4,3
Mars	3,7	7,8	-4,1
Total	15,1	28,7	-13,6

Les valeurs indiquées ont été arrondies. Les totaux ne correspondent donc pas à la somme des valeurs indiquées. Il en est de même pour les différences.

4.3.4.5 Analyse des résultats du scénario de substitution et discussion

Les résultats du scénario de substitution biénergie montrent que l'utilisation des ATC comme équipement de gestion de pointe liée au chauffage a permis de :

- garder inchangée la puissance maximale appelée du bâtiment d'environ 1 110 kW,
- augmenter le facteur d'utilisation mensuel de 2 à 3%,
- maintenir une consommation et des coûts totaux d'énergie comparables,
- réduire les émissions de GES de 13,6 tCO₂éq, soit 47% des émissions totales de l'hiver.

Dans le contexte actuel d'exemplarité de l'État visant à décarboner le chauffage des bâtiments institutionnels et la nécessité d'ajouter des mesures de gestion de la demande d'électricité en hiver, une telle utilisation des ATC apparaît comme une option à considérer pour atteindre rapidement et de façon pérenne les objectifs de décarbonation visés. Le mode de contrôle actuel des ATC du site #10, essentiellement basé sur un horaire pour autoriser la charge et la décharge, est relativement simple à implanter et la performance qui en découle est notable.

Le scénario de substitution considéré et la méthode de calcul des coûts énergétiques ne mettent toutefois pas de l'avant des économies potentielles permettant de rentabiliser l'investissement requis pour la mise en œuvre des ATC (c.-à-d. les coûts relatifs à la conception, la mise en service, l'opération et la maintenance). Dans le cas spécifique du site #10, où les ATC ont été installés lors d'une réfection de la chaufferie et du démantèlement d'une chaudière au mazout en fin de vie, des fonds devaient déjà être mobilisés, réduisant le surcoût d'installer les ATC. D'autre part, la seconde chaudière au mazout, celle qui était déjà en place et qui a été conservée au moment d'installer les ATC, a aussi nécessité des coûts pour la convertir au gaz naturel, pour démanteler le réservoir de mazout, pour effectuer son entretien annuel par la suite, etc. Tous ces coûts devraient être considérés afin de réaliser une analyse économique du scénario avec ATC et du scénario de substitution, ce qui n'a pu être fait dans ce projet de recherche. Enfin, le scénario de substitution est considéré comme « représentatif » de la pratique courante qui aurait été retenue dans un cas comme celui du site #10, soit un appel maximal de puissance représentant 40% des coûts mensuels d'électricité, un profil de demande assez plat durant les heures d'occupation et une CTA de combustible respectant le critère d'exemplarité de l'État.

Ce scénario de substitution biénergie concorde donc avec ce qu'on estime qui aurait été fait lors de la réfection de la chaufferie si les ATC n'avaient pas été installés. Or, en visant décarboner le chauffage des bâtiments institutionnels, tout en limitant les impacts sur la demande d'électricité en hiver, le scénario avec ATC mène à un bilan d'émissions de GES et une gestion de la demande appréciables par rapport au scénario de substitution, ce qui n'a toutefois pas pu être traduit en termes économiques. Il faudrait considérer un incitatif à réduire les émissions de GES (p. ex. en $\$/\text{tCO}_2\text{éq}$), tel que celui offert par des programmes de subvention gouvernementaux ou celui fixé par le marché d'échange de droits d'émissions entre le Québec et la Californie, afin de compléter l'analyse économique.³⁰

De plus, le fait que les ATC n'aient pas eu d'impact sur l'appel maximal mensuel et hivernal de puissance du bâtiment, tout en permettant de réduire les émissions de GES, constitue des coûts évités qui ne se traduisent pas dans les résultats présentés. Les équipements de chauffage pouvant être installés lors d'une réfection et permettant de décarboner un réseau hydronique opéré entre 70 et 85°C sont assez limités, tel qu'exposé dans la revue de la littérature et dans le Chapitre 3. L'installation d'une chaudière électrique à la place des ATC aurait pu desservir le même besoin thermique et mener à une réduction similaire des émissions de GES. Un tel scénario de substitution, dénommé « 100% électrique », a été considéré pour d'autres sites du Rapport technique. Ces sites rencontraient l'un des critères suivants : (1) le réseau de chauffage hydronique, avant l'installation des ATC, était déjà complètement électrifié; ou (2) la CTA de combustible, après l'installation des ATC, ne permettait pas d'augmenter la consommation de combustible en période de pointe, tout en respectant le critère d'exemplarité de l'État (c.-à-d. CTA de combustible inférieure à 15% de la CTA d'énergie). Le site #10 ne répond pas ces critères, d'où le scénario de substitution biénergie qui a été considéré. Toutefois, les coûts évités de l'impact sur l'appel maximal de puissance auraient été mis de l'avant en considérant un scénario 100% électrique : si une chaudière électrique avait desservi le même besoin

³⁰ Le programme « ÉcoPerformance » du gouvernement du Québec offre jusqu'à 125 $\$/\text{tCO}_2\text{éq}$ durant une période maximale de 10 ans (<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/ecoperformance>). Le prix de vente de droits d'émissions sur le marché Québec-Californie variait quant à lui entre 35 et 40 $\$/\text{tCO}_2\text{éq}$ en 2022 (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/Ventes-encheres.htm>).

thermique que les ATC, l'appel de puissance du bâtiment aurait augmenté de 97 kW en moyenne lors des périodes de pointe. Cette augmentation correspond à la puissance totale, **en moyenne**, fournie par les ATC estimée à partir du Tableau 4.10 et en supposant un rendement énergétique de 100% pour la chaudière électrique. Un tel impact représente une augmentation mensuelle du coût d'appel de puissance d'environ 1 430\$. Cette augmentation mensuelle serait d'environ 3 540\$ si on considérait plutôt la puissance **maximale** fournie par les ATC (~240 kW). Selon les scénarios avec ATC et biénergie, le coût mensuel d'appel de puissance de 16 250\$ du site #10 représente déjà 40% des coûts d'électricité, ce qui rend peu plausible, économiquement parlant, d'utiliser une chaudière électrique pour combler les mêmes besoins thermiques. Cela illustre une des barrières à la décarbonation du chauffage des bâtiments C&I au Québec. Pour qu'un scénario 100% électrique soit plausible pour ce site, il faudrait pouvoir simuler des séquences d'opération différentes du réseau de chauffage et des équipements électriques dans le bâtiment. Cela n'a pas pu être fait dans ce projet. Dans d'éventuels travaux de recherche, il faudrait un modèle énergétique détaillé de l'enveloppe du bâtiment et de ses équipements pour le faire. Cela souligne que l'utilisation d'ATC comme équipement de gestion de pointe évite des coûts d'augmentation de l'appel maximal de puissance qui n'ont pu être inclus dans le scénario de substitution biénergie considéré.

Tel qu'évoqué dans la revue de la littérature, l'approche de substitution par le rendement énergétique limite les options pouvant être considérées : les chaudières au combustible et électrique sont essentiellement les deux seuls types d'équipements adaptés à cette approche. Pour comparer l'impact des ATC à d'autres équipements de stockage thermique (p. ex. les réservoirs d'eau chaude sous pression), à d'autres mesures de gestion de la demande (p. ex. réviser les séquences d'opération des équipements électriques et du réseau de chauffage), ou encore à des mesures visant à réduire la demande de chauffage en période de pointe (p. ex. remplacer les fenêtres, colmater les points d'infiltration d'air, améliorer l'isolation, etc.), une approche différente serait requise. Une approche par modélisation et simulation énergétique serait à envisager pour analyser de tels scénarios dans les travaux futurs.

Enfin, un scénario biénergie qui aurait pu être considéré avec une approche de substitution par le rendement énergétique est l'utilisation du gaz naturel renouvelable. Le pouvoir calorifique et le rendement de combustion de ce gaz sont similaires à ceux du gaz naturel d'origine fossile (ou traditionnel). Au niveau économique, le coût unitaire ($\$/m^3$) du gaz naturel renouvelable est entre 1,3 à près de 2 fois celui du gaz traditionnel (Whitmore & Pineau, 2022, p. 29), ce qui aurait induit un impact sur les coûts énergétiques, comparativement aux scénarios qui ont été considérés (c.-à-d. avec ATC et biénergie avec du gaz traditionnel). En revanche, l'intensité des émissions de GES liées à la consommation de gaz naturel renouvelable est, en règle générale, inférieure à celle du gaz traditionnel. La consommation de gaz naturel renouvelable plutôt que traditionnel aurait donc mené à une réduction des émissions de GES comparable à celle du scénario avec ATC. Toutefois, la possibilité de consommer du gaz naturel renouvelable au Québec est assez récente et peu de données sont disponibles sur sa production (Whitmore & Pineau, 2022, p. 28). L'intensité des émissions de GES du gaz naturel renouvelable offert au Québec est encore peu documentée et difficile à estimer puisque dépendante de nombreux facteurs dont : la matière organique valorisée, les procédés de traitement et les sources d'énergie utilisés. Il n'a donc pas été possible de considérer un scénario de substitution biénergie avec du gaz naturel renouvelable. Actuellement, la capacité de production du gaz naturel renouvelable et son injection dans le réseau gazier au Québec sont limitées : un règlement en vigueur (R-6.01, r. 4.3) contraindra d'ici 2025 les distributeurs à injecter du gaz de source renouvelable, incluant le gaz naturel renouvelable, à la hauteur de 5% du volume total livré et le Plan pour une économie verte 2030 mentionne l'objectif du gouvernement de porter ce seuil à 10% d'ici 2030 (Gouvernement du Québec, 2020, p. 73). Il serait alors difficile de généraliser les constats quant à la décarbonation d'un parc immobilier tel que celui des CSS. Le facteur d'intensité des émissions de GES du gaz naturel disponible au Québec est donc amené à diminuer quelque peu au cours des prochaines années, ce qui devra être considéré vis-à-vis des résultats présentés dans ce mémoire. Il serait pertinent que des travaux futurs évaluent si l'usage du gaz naturel renouvelable, à des fins de gestion de la demande liée au chauffage des bâtiments C&I, est souhaitable considérant la capacité de production limitée et les objectifs de décarbonation d'autres secteurs d'activités dont le transport lourd et les procédés industriels.

4.4 Performance actuelle d'autres ATC et synthèse

Cette section vise à mettre en perspective les indicateurs de performance des ATC du site #10 avec ceux d'autres sites couverts par le Rapport technique. Elle conclut ce chapitre avec des constats généraux sur la performance actuelle d'ATC opérés dans des bâtiments de CSS.

Le Tableau 4.23 présente les indicateurs de la performance actuelle tirés du Rapport technique pour les sites où ils ont pu être quantifiés, expliquant l'absence de certains sites.

Tableau 4.23 Indicateurs de performance des ATC selon le scénario de substitution retenu
Adapté de D'Avignon (2022, p. 52, 63-64)

Caractéristiques Site, ATC			Indicateurs de la performance actuelle			
ID Site	Utilis. ATC (Nb ATC)	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	$\eta_{ATC,hiver}$ (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]
Scénario de subst. 100% électrique						
#1	S. princ. (1)	Oui	-51 [-36%]	78	-2 500 [-18%]	~0 [~0%]
#2	S. princ. (1)	Oui	-44 [-44%]	70	-1 500 [-18%]	
#9	G. pte. (1)	Non	-37 [-15%]	83	+1 900 [+4%]	
#11	G. pte. (2)	Non	-19 [-5%]	58; 66	-750 [-1%]	
#16*	G. pte. (1)	Oui	-68 [-32%]	89	-2 200 [-11%]	
#18	S. princ. (1)	Non	-30 [-33%]	96	-1 600 [-10%]	
Moyenne			[-27%]	s. o.	[-9%]	[~0%]
Scénario de subst. biénergie						
#4*	S. princ. (3)	Oui	-5 [-3%]	86; 86; 89	-1 400 [-6%]	-21,6 [-98%]
#5*	S. princ. (1); G. pte. (1)	Oui	+35 [+29%]	88; 73	-1 100 [-5%]	-36,0 [-95%]
#10	G. pte. (3)	Oui	~0 [~0%]	79; 84; 73	+300 [~0%]	-13,6 [-47%]
Moyenne			[+9%]	s. o.	[-3%]	[-80%]
*Ces sites ont plus d'un compteur d'électricité. Ceux-ci ont été combinés, tant dans le scénario avec ATC que de substitution. Le tarif d'électricité considéré a été établi en fonction de l'appel max. total de puissance de l'hiver. Cette méthode a donc un impact sur les résultats indiqués pour $\Delta P_{max,hiver}$ et $\Delta Coûts_{hiver}$. $\Delta P_{max,hiver}$: Impact de l'ATC sur la puissance max. appelée du site pendant la période d'hiver $P_{max,subst}$: Puissance max. appelée du site pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution $\Delta Coûts_{hiver}$: Impact de l'ATC sur les coûts énergétiques pendant la période d'hiver $Coûts_{subst}$: Coûts énergétiques pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution $\Delta E_{GES,hiver}$: Impact de l'ATC sur les émissions de GES du site pendant la période d'hiver $E_{GES,subst}$: Émissions de GES du site pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution						

Les sites sont classés selon le scénario de substitution considéré, soit 100% électrique ou biénergie. Pour rappel, le scénario 100% électrique introduit au paragraphe 4.3.4.5 consiste à

comparer l'utilisation des ATC à une chaudière électrique qui aurait été installée pour desservir le même besoin thermique, avec un rendement énergétique de 100%. Les scénarios biénergie sont similaires à celui qui a été détaillé dans ce chapitre pour le site #10, à la différence près que le propane a été considéré comme énergie de substitution plutôt que le gaz naturel pour les sites #4 et 5. La colonne « Utilis. ATC » indique l'utilisation de l'ATC, soit comme source principale de chauffage (S. princ.) ou comme équipement de gestion de pointe (G. pte.). La colonne « Ex. État » indique si, dans le scénario avec ATC, le critère d'exemplarité de l'État est rencontré. La majorité des sites rencontrent ce critère, hormis les sites #9, 11 et 18. Les indicateurs de performance témoignent que :

- pour les scénarios 100% électrique, les principaux impacts des ATC ont été de réduire la puissance maximale appelée durant l'hiver ($\Delta P_{max,hiver}$) de 27% en moyenne et de réduire les coûts énergétiques ($\Delta Coûts_{hiver}$) de 9% en moyenne, illustrant le déplacement de la demande maximale par rapport à une chaudière électrique;
- pour les scénarios biénergie, incluant le site #10, le principal impact des ATC a été de réduire les émissions de GES durant l'hiver ($\Delta E_{GES,hiver}$) de 80% en moyenne, tout en maintenant des coûts énergétiques sensiblement les mêmes et en n'impactant pas significativement l'appel maximal de puissance dans 2 des 3 cas;
- les rendements énergétiques saisonniers des ATC ($\eta_{ATC,hiver}$) varient largement, de 58 à 96%, et dépendent surtout de l'utilisation des ATC et de leurs conditions d'opération.

Ces indicateurs témoignent que la performance actuelle de ces ATC, sans nécessairement être optimale, est notable. En considérant les pratiques de mise en œuvre abordées au Chapitre 3, lesquelles s'appliquent aux ATC présentés dans ce tableau, ce niveau de performance actuelle peut pallier l'incertitude qui a été perçue lors des entrevues avec certains participants. Avec l'adoption des bonnes pratiques identifiées à la fin du Chapitre 3, ainsi qu'en ayant identifié des pistes d'amélioration de la performance actuelle avec la méthode utilisée dans ce chapitre, il est raisonnable de penser que la performance in situ future des ATC pourra être améliorée.

Les remarques et les limites du scénario biénergie discutées précédemment s'appliquent aux résultats des sites #4 et 5 présentés dans le Tableau 4.23. Pour ce qui est des scénarios 100% électrique, réduire la puissance maximale appelée durant l'hiver a un impact sur le coût

minimal facturé d'appel de puissance le reste de l'année, ce qui n'a pas pu être inclus dans les économies présentées. Pour des bâtiments scolaires, où typiquement l'occupation et la demande d'électricité sont moindres durant l'été que l'hiver, l'abaissement de la puissance minimale facturée peut réduire les coûts d'électricité. Dans les travaux futurs, cet impact mériterait d'être évalué. De plus, l'impact sur la demande d'électricité pourrait être évalué différemment que par le strict impact sur l'appel maximal mensuel et saisonnier de puissance, par exemple avec un indicateur de flexibilité énergétique tel le BEFI discuté dans la revue de la littérature. Enfin, l'impact des ATC sur les émissions de GES a été considéré négligeable par rapport à un scénario 100% électrique. Or, le facteur d'intensité des émissions de GES considéré pour l'électricité, tout comme celui présenté dans le Tableau 4.6, est une moyenne annuelle constante. Advenant que des données soient disponibles sur les émissions de GES liées à la consommation d'électricité et qui tiennent compte de paramètres influençant l'opération des réseaux, donc leurs émissions, tels que le moment de la journée et les conditions météorologiques, il serait pertinent d'évaluer l'impact des ATC à contribuer à réduire la demande d'électricité sur le réseau, ainsi que ses émissions. Par exemple, la décharge d'ATC durant les périodes de pointe critique d'Hydro-Québec, moment où l'intensité des émissions de GES est supérieure à la moyenne annuelle, pourrait mener à une réduction des émissions par rapport à l'utilisation d'une chaudière électrique. Cet impact n'est pas inclus dans les résultats présentés.

Le Tableau-A IX-1 à l'Annexe IX présente les résultats détaillés pour chaque site et chaque ATC visé par le Rapport technique, incluant ceux pour lesquels un scénario de substitution n'a pu être évalué. L'analyse des données d'opération de certains de ces sites a tout de même permis d'en dégager des constats, d'où le fait qu'ils sont inclus. Ce tableau synthétise les constats qui ont été tirés à partir de l'analyse des données d'opération et identifie des actions spécifiques recommandées pour chacun des sites où des déficiences ont été ciblées, telle une :

- a) défaillance de composant de l'ATC (p. ex. pompe, ventilateur, éléments chauffants);
- b) déficience du contrôle, soit due à des éléments externes au contrôleur de l'ATC (p. ex. mesurage de la puissance appelée du bâtiment, sonde de température extérieure), ou internes (p. ex. valeurs des canaux CLoc);

- c) opération non souhaitable de l'ATC (p. ex. maintien prolongé de températures de briques élevées);
- d) opération de l'ATC menant à des pertes thermiques pouvant être évitées;
- e) incohérence entre les consignes affichées sur l'interface du BMS et le mode de contrôle de l'ATC défini par les canaux CLoc de son contrôleur.

Ces exemples de déficiences réitèrent la pertinence d'analyser les données d'opération de l'ATC et du bâtiment afin de les détecter, de les circonscrire et d'identifier des actions à prendre. Le constat global qui est tiré en regard de ces déficiences est que le suivi de la performance et le suivi de l'opération doivent être améliorés. Le Chapitre 3 a mis en évidence qu'avec les outils actuellement en place, ces suivis sont difficiles à exécuter sur une base régulière. La méthode d'analyse des données d'opération utilisée dans ce chapitre témoigne d'une part de l'ampleur du travail de traitement et d'analyse des données et d'autre part, du potentiel de cette méthode à identifier des déficiences et des pistes d'amélioration. Pour outiller les opérateurs dans l'exécution des suivis **en continu** de la performance et de l'opération de l'ATC, il serait fort utile d'automatiser l'acquisition, le traitement et l'analyse de ces données. Ces suivis ont un impact majeur sur l'atteinte et la pérennité de la performance visée. À ce titre, certaines figures présentées dans ce chapitre (p. ex. la Figure 4.7, la Figure 4.10, la Figure 4.12, la Figure 4.14 et la Figure 4.15) ainsi que des paramètres énergétiques et des indicateurs de performance quantifiés (p. ex. la puissance thermique fournie et le rendement énergétique) pourraient être affichés sur le tableau de bord d'un BMS ou d'un SGE permettant de suivre en continu la performance et l'opération de l'ATC. La détection de défaillance serait par le fait même plus rapide et ciblée.

CHAPITRE 5

SOLUTIONS POUR AMÉLIORER LES PRATIQUES ET LA PERFORMANCE

Ce 5^e et dernier chapitre vise à proposer des solutions pour améliorer les pratiques actuelles de mise en œuvre et la performance des ATC hydroniques. Ces solutions sont complémentaires aux bonnes pratiques identifiées dans le Chapitre 3 et à l'importance de l'analyse en continu de la performance mise de l'avant dans le Chapitre 4. D'une certaine façon, ces deux chapitres précédents proposent déjà des solutions à adopter dont :

- la fiche synthèse des tâches de maintenance préventive à effectuer présentée à l'Annexe V, permettant de mieux planifier les ressources à allouer;
- la méthode d'analyse des données d'opération de l'ATC hydronique, permettant d'identifier des pistes d'amélioration de la performance in situ et de recommander des actions spécifiques telles que celles présentées à l'Annexe IX.

Un défi touchant la phase de conception qui a été identifié au début du Chapitre 3 (voir Tableau 3.1, défi no 3), soit « d'évaluer la capacité du système de stockage thermique à fournir la puissance et l'énergie thermiques pour combler les besoins », n'a pu être adressé en proposant une bonne pratique à adopter. Sachant que l'information disponible dans la littérature sur la capacité actuelle utilisable d'énergie stockée est partielle, il doit être adressé en caractérisant l'ATC hydronique lui-même, plutôt que sa mise en œuvre. Ce chapitre porte sur l'analyse de données d'opération exploitées dans le Chapitre 4 afin d'établir une relation simplifiée pour estimer la puissance thermique maximale qu'un ATC (modèle de 80 kW) peut fournir dans diverses conditions d'opération. Cette relation, combinée aux résultats du Chapitre 4 sur le coefficient de déperditions thermiques effectif, permettra de proposer un gabarit de bilan d'énergie de l'ATC hydronique. Ce gabarit est basé sur le modèle proposé par l'AHRI (2017) qui a été discuté dans la sous-section 1.1.3 de la revue de la littérature. Il est recommandé d'utiliser un tel gabarit lors de la conception pour : 1) valider que l'ATC hydronique peut satisfaire les besoins thermiques à combler lors d'une journée critique et 2) quantifier le potentiel de déplacement ou de nivelage de la demande.

5.1 Méthode d'établissement d'une relation pour estimer la puissance thermique maximale qu'un ATC peut fournir

La méthode employée pour établir la relation cherchée comprend les étapes suivantes :

1. Identifier les données à utiliser,
2. Analyser les données et établir des régressions,
3. Comparer la relation établie avec les données d'autres sites.

Les deux premières étapes sont complétées en utilisant les données d'un même site, alors que la troisième étape exploite les données d'autres sites afin de discuter de l'applicabilité de la relation. Les sous-sections qui suivent détaillent chacune des étapes.

5.1.1 Étape 1 : Identifier les données à utiliser

Les données d'opération présentées dans le Chapitre 4 ont été collectées dans l'objectif d'analyser la performance actuelle d'ATC opérés dans des bâtiments institutionnels. Le Chapitre 4 a traité plus en détail des données des ATC du site #10, mais les données d'autres sites présentés dans le Rapport technique sont également disponibles. Ces données sont réutilisées dans ce chapitre. D'après l'équation (1.2) et la Figure 1.6 présentées dans la revue de la littérature, il est connu que la puissance thermique fournie dépend principalement de la température des briques, puisque c'est cette variable qui détermine la quantité d'énergie stockée (Q_{stock}); la masse et la capacité thermique massique des briques ($(MC_p)_{briques}$) étant considérées constantes. Pour que la relation à établir outille la conception, il faut donc que les données de températures des briques couvrent la plus grande plage possible de température. Aussi, par puissance thermique maximale, il est entendu que le débit d'air circulant dans l'ATC est maximal. La vitesse de rotation du ventilateur est donc maximale. Cela permet d'éliminer le débit d'air (\dot{V}_{air}) des variables influençant la puissance thermique fournie indiquées dans l'équation (1.2). Pour cibler les ATC dont les données peuvent être utilisées pour établir cette relation, les critères suivants ont été considérés :

- a) le débit d'eau circulant dans l'échangeur de chaleur doit avoir été mesuré pendant au moins quelques heures durant la période d'analyse et montré de faibles variations;

- b) les températures des 3 noyaux de briques, la température de l'eau à l'entrée et celle à la sortie de l'échangeur de chaleur doivent être disponibles durant la période d'analyse;
- c) la vitesse commandée au moteur du ventilateur doit être disponible et fréquemment proche de la vitesse maximale (c.-à-d. entre 99 et 100%);
- d) l'ATC est en décharge seule (c.-à-d. que les moments de charge et de décharge simultanées sont exclus);
- e) le bilan d'énergie en décharge de l'ATC (*Bilan_{Déch,i}*) doit être compris dans l'incertitude sur ce bilan.

Les critères a) et b) identifient les données qui sont à utiliser pour établir cette relation. Les données d'opération instantanées aux 15 minutes ainsi que les mesures in situ de débit d'eau des trois ATC du site #10 présentées dans le Chapitre 4 répondent à ces critères. La Figure 4.14 a en outre montré que les ventilateurs fonctionnent majoritairement à vitesse maximale et que les ATC se déchargent quotidiennement, ce qui offre un potentiel élevé de données à utiliser et qui rencontre le critère c). De plus, ces ATC sont opérés avec les mêmes consignes et la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur est similaire, ce qui devrait mener à une relation applicable aux trois ATC. Cela permettra d'évaluer si la relation représente le comportement thermique d'ATC opérés de la même manière. Aussi, lorsque ces ATC sont en décharge, ils ne sont pas simultanément en charge, ce qui devrait mener à des températures de noyaux de briques assez uniformes (critère d). Il a en effet été constaté sur d'autres ATC couverts par le Rapport technique que des écarts élevés de températures se maintiennent entre les noyaux lorsque l'ATC est simultanément en charge et en décharge. Finalement, le critère e) vise à utiliser seulement les données d'opération instantanées pour lesquelles le bilan d'énergie en décharge est compris dans l'incertitude indiquée dans le Tableau 4.4, variant entre ± 7 kW et ± 8 kW pour les ATC du site #10. Le but est d'éliminer systématiquement les données aux estampilles temporelles qui résultent en un bilan d'énergie non nul et qui ne peuvent être expliquées par l'incertitude sur ce bilan.

5.1.2 Étape 2 : Analyser les données et établir des régressions

Cette étape consiste à tracer les données des ATC du site #10 qui répondent aux critères identifiés à l'étape 1 et à tester des régressions afin d'établir une relation permettant d'estimer la puissance thermique maximale fournie (c.-à-d. $\dot{Q}_{D\acute{e}ch,max}$ comme variable dépendante) en fonction de la température moyenne des briques (c.-à-d. $\bar{T}_{briques}$ comme variable indépendante). Les impacts de paramètres influents indiqués dans l'équation (1.2) sont aussi analysés, soit le débit d'eau (\dot{V}_{eau}) et la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur ($T_{in,ATC}$). L'équation (5.1) décrit le type de relation qui est cherchée. Cette équation est adaptée de l'équation (1.2) pour considérer que le débit d'air circulant dans l'ATC est maximal.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{D\acute{e}ch,max} &= (\rho \dot{V} C_p)_{eau} \cdot \Delta T_{eau,max} \\ \text{où } \Delta T_{eau,max} &= f(\bar{T}_{briques}, \dot{V}_{eau}, T_{in,ATC}), \text{ lorsqu' } \dot{V}_{air} = \dot{V}_{air,max} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Il est visé que la relation soit la plus simple possible. Des régressions sont testées et comparées, en n'incluant que les paramètres les plus influents. Les indicateurs statistiques R^2 et CV(RMSE) sont quantifiés pour juger de la qualité des régressions. Le seuil minimal acceptable pour le R^2 est de 75% et le seuil maximal pour le CV(RMSE) est de 30%. Les outils de régressions linéaires et non linéaires du logiciel Matlab® sont utilisés. Les distances de Cook sont calculées pour s'assurer que certaines données n'influencent pas anormalement les paramètres de la régression. Le seuil maximal accepté de distance de Cook est de 2.

5.1.3 Étape 3 : Comparer la relation établie avec les données d'autres sites

Cette étape vise à comparer la relation établie à partir des données des ATC du site #10 aux données d'autres ATC. Le but est d'évaluer à quel point cette relation permet d'estimer la puissance thermique maximale fournie par des ATC opérés dans des conditions différentes de ceux du site #10. Les critères définis à l'étape 1 sont considérés pour cibler ces autres ATC. Les ATC des sites #5 et #11 du Rapport technique sont ceux qui rencontrent le mieux ces critères, sans toutefois totalement les respecter pour les raisons énoncées à la page suivante.

- Les deux ATC du site #5 sont rarement en décharge seule (critère d). Ils sont toutefois fréquemment en décharge et en charge simultanées avec une faible puissance appelée, c.-à-d. inférieure à 4,44 kW, soit la puissance d'une paire d'éléments chauffants. L'hypothèse retenue dans le Rapport technique est que l'ATC1 comporterait 3 paires d'éléments défaillantes totalisant 13,32 kW. Il est donc raisonnable d'analyser ces données, puisque l'ATC n'est potentiellement pas en charge à ces moments.
- Les températures des noyaux de briques des deux ATC du site #11 sont disponibles (critère b), mais elles sont enregistrées avec une précision de 10°C, ce qui augmente l'incertitude sur le bilan d'énergie en décharge (critère e). À titre comparatif, elle est évaluée à ±17 kW, comparativement à ±8 kW pour les ATC2 et 3 du site #10 dont les données sont enregistrées à 1°C près. De plus, l'analyse de performance de l'ATC1 du site #11 présentée dans le Rapport technique et dans Drouet (2022) montre une faible quantité d'énergie fournie par cet ATC durant la période d'hiver 2020-2021 et des lacunes au niveau du contrôle. Ainsi, seules les données de l'ATC2 sont analysées.

Pour discuter de l'applicabilité de la régression établie aux données d'ATC opérés dans des conditions différentes, les débits d'eau et les températures de l'eau à l'entrée des échangeurs de chaleur sont comparés. Pour comparer les écarts de température entre les trois noyaux de briques, l'indice d'uniformité de température *TUI* (*Temperature Uniformity Index*, en anglais) est utilisé et calculé selon l'équation (5.2). Les noyaux sont numérotés de 1 à n dans l'équation.

$$TUI = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 (T_{briques,n} - \bar{T}_{briques})^2}}{\bar{T}_{briques}} \quad (5.2)$$

Adaptée de Trevisan, Wang, Guedez, & Laumert (2022, p. 6)

Il est à noter que les données utilisées des sites #5 et #11 ont été nettoyées et rendues disponibles à la suite des projets complétés par deux étudiants du groupe de recherche ayant produits leurs propres rapports, soient Ngansop Ngopjop (2021) pour les ATC du site #5 et Drouet (2022) pour ceux du site #11.

5.2 Résultats et analyses

En suivant l'étape 1 de la méthode, les puissances thermiques fournies par les trois ATC de 80 kW du site #10, lorsque la vitesse commandée au moteur du ventilateur est entre 99 et 100% de la vitesse maximale, sont extraites des résultats obtenus au Chapitre 4. Le Tableau 5.1 indique le nombre **total** de points, dans chaque plage de température moyenne des noyaux de briques, qui rencontrent les critères a) à d) définis dans la sous-section 5.1.1. Quant au critère e), le Tableau 5.1 indique le nombre de points **conservés**, soient ceux dont la valeur du bilan d'énergie en décharge est comprise dans l'incertitude.

Tableau 5.1 Nombre de points conservés par plage de température moyenne des briques

Température moy. des briques (°C)	Nb de points conservés / Nb de points total (%Total)		
	ATC1	ATC2	ATC3
[75; 125[	191 / 630 (30%)	313 / 375 (83%)	214 / 254 (84%)
[125; 175[	269 / 407 (66%)	387 / 457 (85%)	391 / 493 (79%)
[175; 225[	228 / 352 (65%)	281 / 329 (85%)	263 / 343 (77%)
[225; 275[	175 / 274 (64%)	239 / 266 (90%)	217 / 273 (79%)
[275; 325[	158 / 240 (66%)	174 / 236 (74%)	183 / 229 (80%)
[325; 375[	125 / 213 (59%)	114 / 213 (54%)	159 / 223 (71%)
[375; 425[	75 / 163 (46%)	58 / 147 (39%)	98 / 165 (59%)
[425; 475[	68 / 112 (61%)	50 / 93 (54%)	60 / 99 (61%)
[475; 525[	46 / 77 (60%)	38 / 64 (59%)	41 / 70 (59%)
[525; 575[	41 / 69 (59%)	30 / 56 (54%)	36 / 75 (48%)
[575; 625[	28 / 54 (52%)	23 / 45 (51%)	26 / 53 (49%)
[625; 675[	13 / 33 (39%)	14 / 30 (47%)	15 / 35 (43%)
[675; 725[	2 / 10 (20%)	3 / 12 (25%)	2 / 10 (20%)
Total	1419 / 2634 (54%)	1724 / 2323 (74%)	1705 / 2322 (73%)

Le critère e) a mené à retirer un nombre considérable de points : seuls 54% des points de l'ATC1, 74% des points de l'ATC2 et 73% des points de l'ATC3 y répondaient. Des variations ponctuelles du débit d'eau par rapport aux valeurs mesurées et des variations de température entre les noyaux de briques par rapport à la moyenne, qui impactent l'estimation de l'énergie stockée (Q_{stock}), peuvent expliquer que le bilan d'énergie en décharge soit momentanément au-

delà de l'incertitude.³¹ Les plages de température élevées (>625°C) sont celles ayant les nombres **totaux** de points disponibles et les pourcentages de points **conservés** les plus faibles : les ATC fournissent alors une puissance faisant décroître rapidement la température des briques, ce qui réduit le nombre de points.

La Figure 5.1 montre les puissances thermiques maximales fournies ($\dot{Q}_{D\acute{e}ch,max}$) par chaque ATC en fonction de la température moyenne des noyaux de briques. Cette figure montre que pour une même température moyenne des briques, l'ATC2 fournit généralement une puissance supérieure à celle des deux autres ATC. L'écart entre les puissances fournies est plus marqué à partir d'environ 300°C. Le débit volumique d'eau est le facteur qui influence le plus cet écart puisque : pour tous les points montrés sur la figure, la vitesse commandée au moteur du ventilateur est maximale, la température de l'eau à l'entrée des échangeurs de chaleur est admise similaire, donc la densité et la capacité thermique de l'eau sont elles aussi similaires. Cette observation est conséquente avec les mesures de débit présentées au paragraphe 4.3.3.1 qui ont montré que le débit d'eau de l'ATC2 est en moyenne 12% supérieur à celui de l'ATC3 et 32% supérieur à celui de l'ATC1.

La Figure 5.2 présente la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur de chaleur, calculée selon l'équation (4.3), en fonction de la température moyenne des briques. Le symbole $\Delta T_{eau,max}$ est utilisé pour cette différence de température, indiquant que la vitesse commandée au moteur du ventilateur est maximale. Pour rappel, l'équation (4.3) implique uniquement des données mesurées aux 15 minutes, comparativement aux puissances présentées sur la Figure 5.1 qui sont calculées à partir de valeurs moyennes de débit, de densité et de capacité thermique d'eau. La Figure 5.2 montre des écarts peu marqués entre les différences de température $\Delta T_{eau,max}$ des trois ATC, bien qu'il est attendu que le débit d'eau influence celles-ci, comme l'a indiqué l'équation (5.1) à l'étape 2 de la méthode.

³¹ Aussi, tel qu'expliqué au paragraphe 4.2.3.1, le débit d'eau de l'ATC1 n'a pas été mesuré directement, mais plutôt calculé par un bilan de masse. Cela peut expliquer que le nombre de points retirés soit plus élevé pour cet ATC que les deux autres.

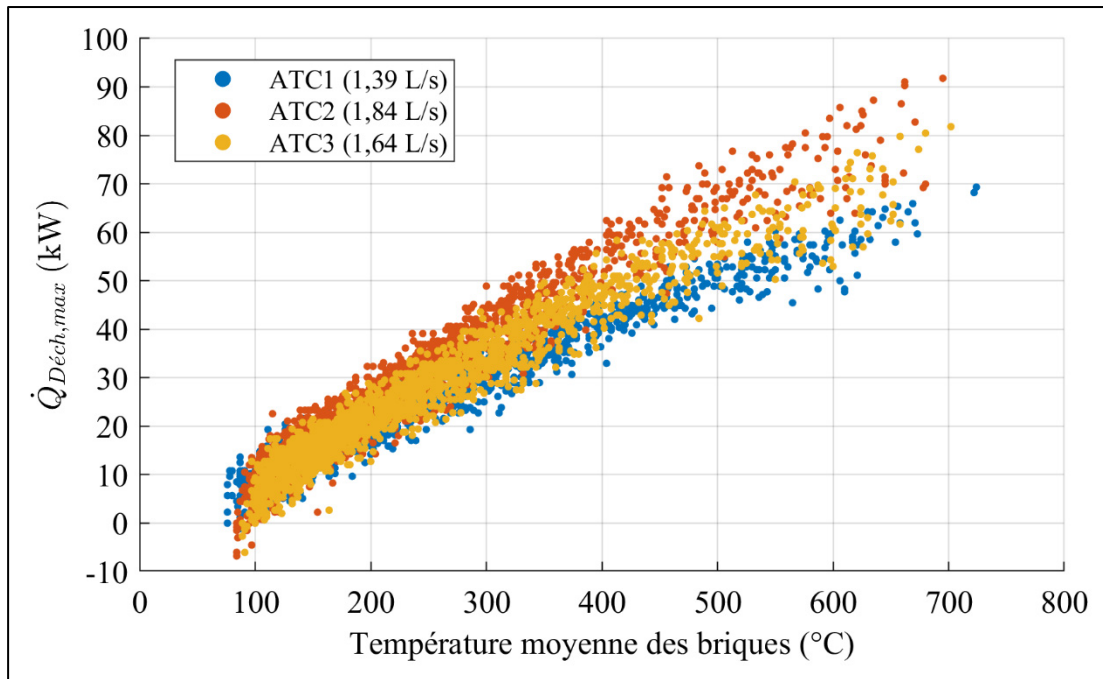


Figure 5.1 Puissance thermique fournie en fonction de la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

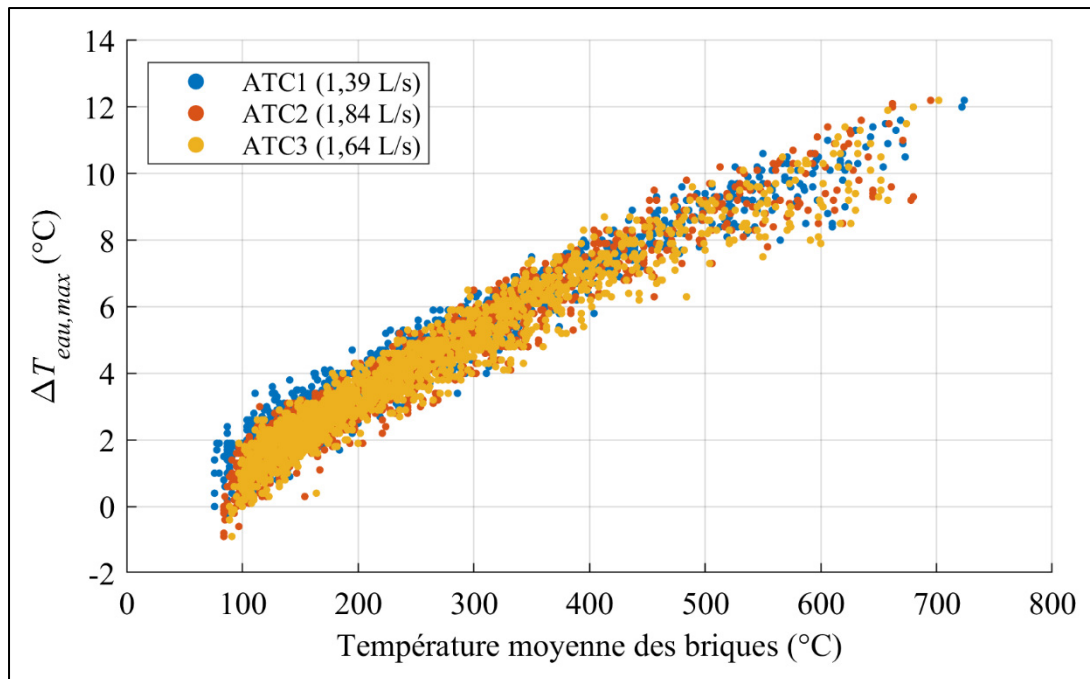


Figure 5.2 Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur en fonction de la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

Il apparaît qu'exprimer la différence de température $\Delta T_{eau,max}$ en fonction de la température moyenne des briques permette d'établir une régression simplifiée pour estimer la puissance thermique maximale pouvant être fournie par l'ATC ($\dot{Q}_{D\acute{e}ch,max}$). L'analyse de la covariance entre les valeurs de $\Delta T_{eau,max}$ pour chaque ATC et la température moyenne des briques a montré que les paramètres des régressions linéaires (c.-à-d. les pentes et les ordonnées à l'origine) sont statistiquement distincts à un niveau de confiance de 95%. Les différents débits moyens d'eau, 1,39L/s (ATC1), 1,84 L/s (ATC2) et 1,64 L/s (ATC3), ont donc un impact significatif sur $\Delta T_{eau,max}$ d'un point de vue statistique. En effet, l'ATC1 a tendance à élever davantage la température de l'eau que les autres ATC : le pourcentage d'écart entre la valeur de $\Delta T_{eau,max}$ de l'ATC1 et celle des autres ATC est en moyenne de 15% pour des températures de briques inférieures à 300°C. Comme son débit est plus faible que les autres, l'eau circule plus lentement et est davantage réchauffée. Au-delà de 400°C, l'impact du débit d'eau est moins marqué et le pourcentage d'écart entre les valeurs de $\Delta T_{eau,max}$ des ATC est de moins de 5%. En moyenne, pour des températures de briques entre 100 et 700°C, le pourcentage d'écart entre les valeurs de $\Delta T_{eau,max}$ est de 7%. Un tel écart est jugé négligeable pour établir une relation visant à estimer la puissance thermique maximale que l'ATC peut fournir. Dans ce qui suit, les données des trois débits moyens d'eau sont combinées afin d'établir une seule équation de régression.

Outre le débit, la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur ($T_{in,ATC}$) influence aussi $\Delta T_{eau,max}$ et par conséquent, la puissance thermique maximale fournie. Cette température est supposée similaire pour les trois ATC. La Figure 5.3 a) présente la répartition des données d'opération disponibles selon la température moyenne des briques et $T_{in,ATC}$. L'histogramme de $T_{in,ATC}$, à gauche de la Figure 5.3 a), montre qu'environ 49% des données sont comprises dans la plage [60; 65[°C et 29% sont comprises dans la plage [65; 70[°C. La majorité (78%) des données de température de l'eau à l'entrée de l'échangeur sont donc inférieures à 70°C. Cette distribution de $T_{in,ATC}$, liée à l'opération du réseau de chauffage du site #10, n'est pas idéale pour caractériser la puissance thermique maximale que l'ATC peut fournir : elle engendre des plages pour lesquelles peu de points sont disponibles. C'est particulièrement le cas pour les températures $T_{in,ATC}$ d'environ 70°C et supérieures à 80°C, à des températures moyennes de briques supérieures à 400°C, tel qu'on le voit sur la droite de la Figure 5.3 a).

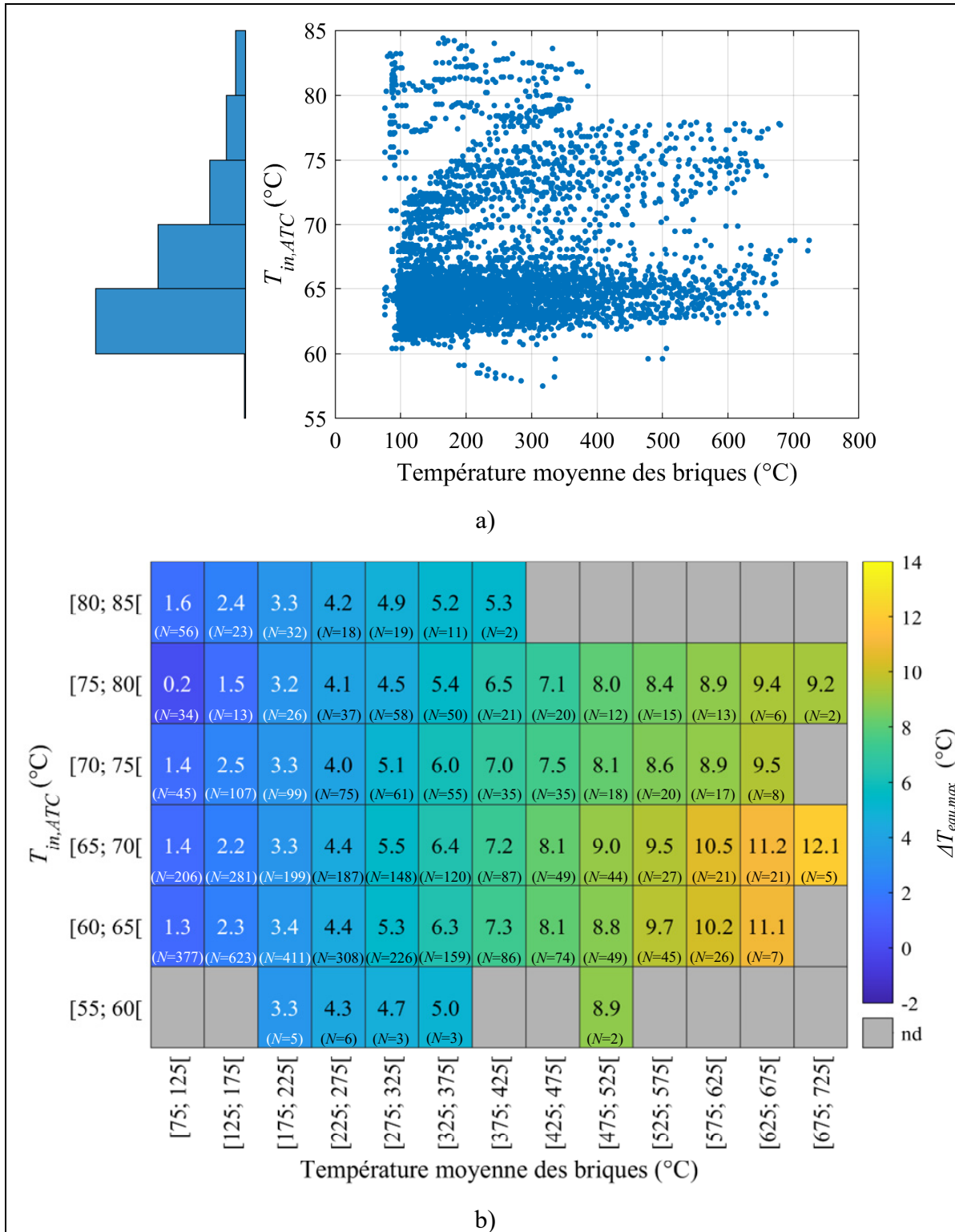


Figure 5.3 Impact de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur sur $\Delta T_{eau,max}$
 a) Températures d'entrée disponibles; b) Valeurs moyennes de $\Delta T_{eau,max}$

La Figure 5.3 b) présente quant à elle les valeurs moyennes de $\Delta T_{eau,max}$ pour les différentes plages de températures de l'eau à l'entrée de l'échangeur et de briques. On dénote quelques plages comprenant peu de points ($N < 10$), ce qui laisse une marge d'erreur élevée sur la moyenne calculée et ne permet pas de tirer de conclusion. Les zones grises « nd » sont des plages d'opération pour lesquelles aucune donnée n'est disponible. Malgré que les données soient partielles et distribuées non uniformément dans les plages, les valeurs moyennes indiquées sur la Figure 5.3 b) montre que, pour une même plage de température de briques, une température $T_{in,ATC}$ plus élevée de 5°C réduit la différence de température $\Delta T_{eau,max}$ de quelques dixièmes de degrés Celsius à jusqu'à $1,6^{\circ}\text{C}$. Cette tendance est cohérente avec le comportement attendu d'un échangeur de chaleur. L'influence de $T_{in,ATC}$ sur $\Delta T_{eau,max}$ est plus marquée dans certaines plages d'opération, mais les données disponibles ne permettent pas d'inclure ce paramètre dans une régression exprimant $\Delta T_{eau,max}$. En vue d'établir une relation simplifiée, incluant les paramètres les plus influents, la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur ne sera pas incluse comme variable indépendante de la régression.

La Figure 5.4 montre la régression polynomiale de second degré qui a été établie. Cette régression permet d'estimer $\Delta T_{eau,max}$ en fonction de la température moyenne des briques. Les distances de Cook ont été calculées afin de s'assurer que chacun des points montrés sur la Figure 5.4 n'influence pas anormalement la régression. Ces distances sont largement inférieures à 2, qui est le critère considéré pour retirer des points. Aussi, la zone grise sur cette figure montre l'intervalle de confiance de la régression à un niveau de confiance de 95%. Le Tableau 5.2 indique les valeurs des coefficients de la régression qui délimitent cet intervalle de confiance. On remarque que l'intervalle de confiance s'élargit à partir d'une température moyenne des briques d'environ 400°C . L'intervalle de confiance couvre diverses plages de températures de l'eau à l'entrée de l'échangeur. Il semble donc raisonnable de ne pas avoir inclus $T_{in,ATC}$ comme paramètre dans la régression. Le $R^2_{ajusté}$ et le CV(RMSE) valent respectivement 94,7% et 13,4%, ce qui convient aux seuils ciblés pour estimer la puissance thermique maximale que l'ATC de 80 kW peut fournir. Pour déterminer $\dot{Q}_{Déch,max}$, la valeur de $\Delta T_{eau,max}$ estimée par la régression doit être multipliée par la densité, le débit et la capacité thermique massique de l'eau, tel que l'indique l'équation (5.1) à l'étape 2 de la méthode.

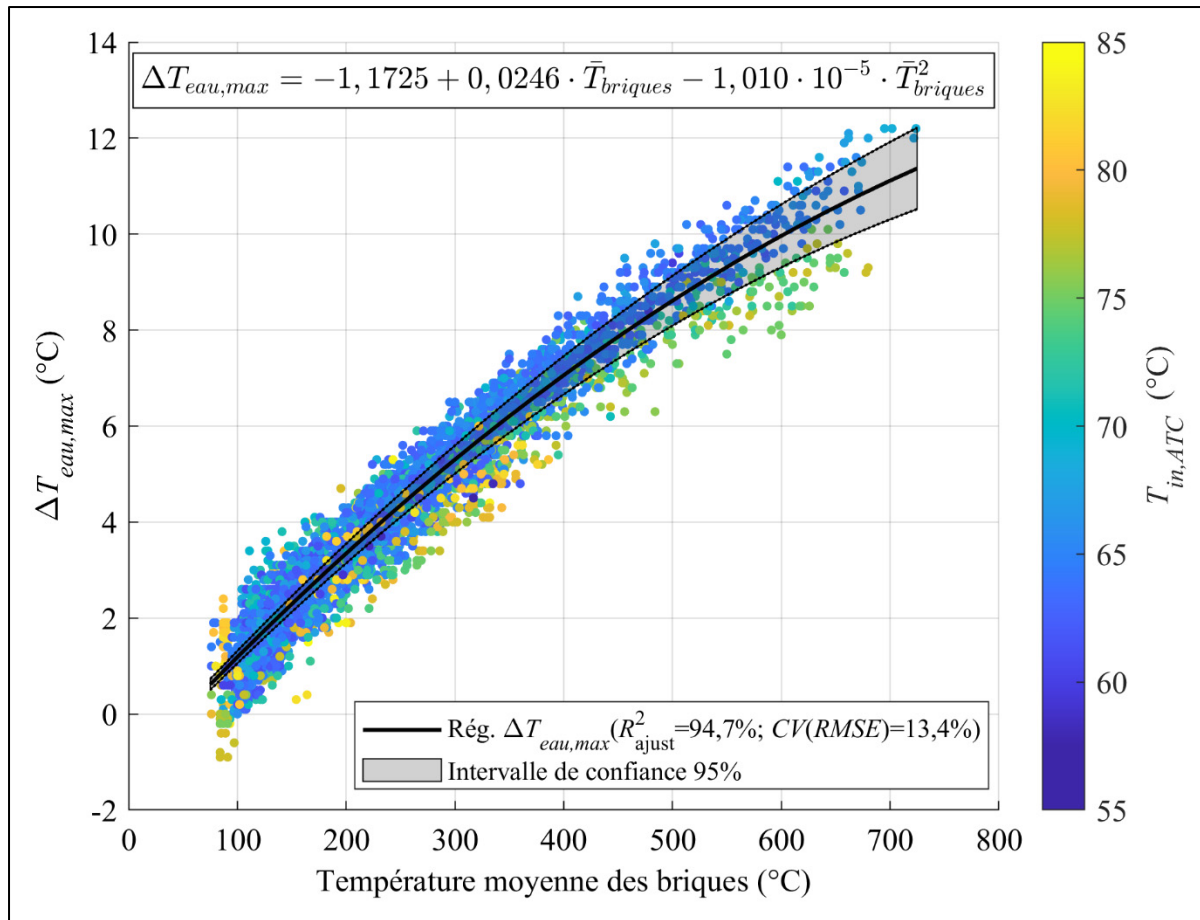


Figure 5.4 Régression entre la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur et la température moyenne des briques (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

Tableau 5.2 Coefficients de la régression entre la différence maximale de température de l'eau et la température moyenne des briques

Coefficient de la régression		Niveau de confiance de 95%	
		Valeur minimale	Valeur maximale
Constante	-1,1725	-1,2431	-1,1019
Terme d'ordre 1	+0,0246	+0,0241	+0,0251
Terme d'ordre 2	$-1,010 \cdot 10^{-5}$	$-1,0875 \cdot 10^{-5}$	$-9,3206 \cdot 10^{-5}$

À partir de cette régression et des valeurs de coefficient de déperditions thermiques effectif présentées dans le Tableau 4.14 du Chapitre 4, la caractérisation de l'ATC hydronique de 80 kW est suffisante pour proposer un gabarit de bilan d'énergie à utiliser lors de la conception. Le Tableau-A X-1 présenté à l'Annexe X est un gabarit de bilan d'énergie heure par heure de

l'ATC basé sur ce que l'AHRI (2017) propose pour d'autres systèmes de stockage thermique. Rappelons que la régression de $\Delta T_{eau,max}$ a été établie à partir de données d'opération liées à des débits d'eau moyens **variant entre 1,39 et 1,84 L/s** et des températures $T_{in,ATC}$ pour la **plupart inférieures à 70°C**. Des conditions d'opération différentes de celles-ci pourraient mener à des écarts notables par rapport à cette régression et son intervalle de confiance.

À cet effet, les données de $\Delta T_{eau,max}$ de l'ATC2 du site #11 affichées sur la Figure 5.5 montrent un écart marqué par rapport aux données utilisées pour établir la régression. Dans ce cas-ci, la régression établie ne s'applique pas. Le débit d'eau moyen mesuré de l'ATC2 du site #11 est de 0,44 L/s, ce qui est largement inférieur aux débits moyens des ATC du site #10. La température de l'eau à l'entrée de l'échangeur est le plus souvent comprise entre 70 et 80°C, ce qui est plus élevé que celle du site #10. Elle peut aussi contribuer à réduire le transfert de chaleur, mais dans une moindre mesure que le débit d'eau d'après les conclusions tirées de la Figure 5.3. En plus d'un différentiel $\Delta T_{eau,max}$ généralement plus faible pour des températures moyennes des briques entre 150 et 300°C, un tel débit d'eau réduit la puissance thermique maximale fournie, comme la Figure 5.6 le montre.

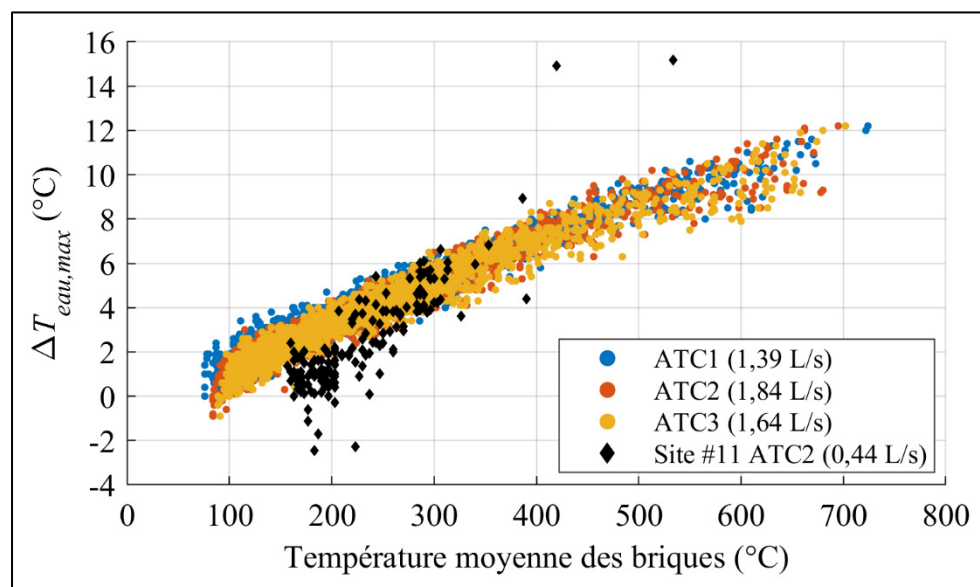


Figure 5.5 Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur d'un ATC avec un débit d'eau de 0,44 L/s (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

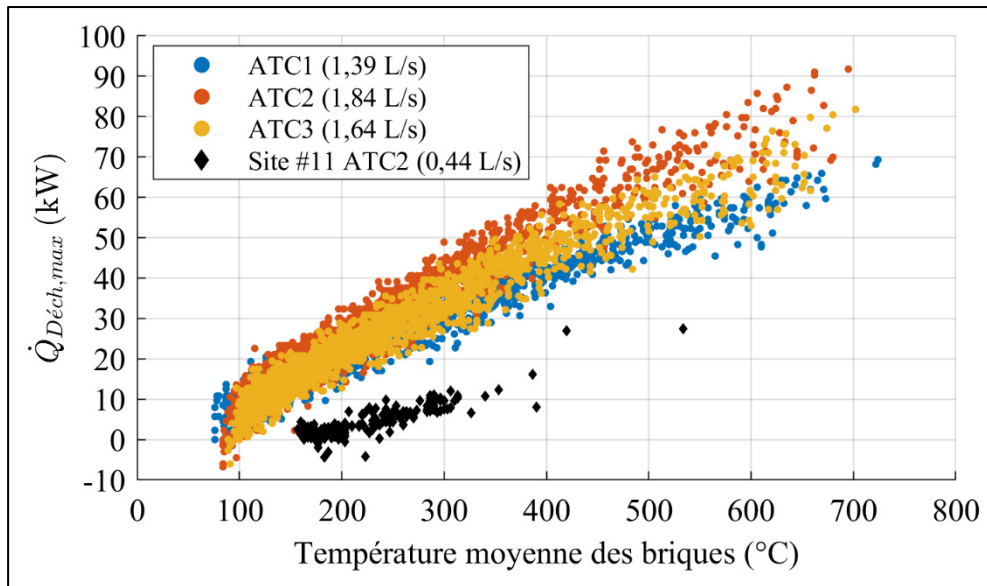


Figure 5.6 Puissance thermique maximale fournie par un ATC avec un débit d'eau de 0,44 L/s (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

En considérant ces écarts de $\Delta T_{eau,max}$ et de $\dot{Q}_{Déch,max}$ induits par un débit anormalement faible, exiger un rapport de balancement de la pompe de l'ATC lors de la mise en service et effectuer un suivi étroit de celle-ci (p. ex. vérifier l'état de la pompe, nettoyer les filtres à tamis pour particules et vérifier la position des robinets) sont donc des bonnes pratiques à adopter pour s'assurer que l'ATC puisse fournir la puissance thermique maximale attendue.

A contrario, les débits d'eau mesurés dans les échangeurs des ATC du site #5 sont dans la même gamme que ceux du site #10 : le débit moyen de l'ATC1 du site #5 est de 1,61 L/s et celui de l'ATC2 est de 1,54 L/s. De plus, la température de l'eau à l'entrée des échangeurs est le plus souvent comprise entre 55 et 70°C, ce qui est similaire aux ATC du site #10. Pourtant, la Figure 5.7 montre que les différences maximales de température de l'eau entre la sortie et l'entrée des échangeurs ($\Delta T_{eau,max}$) de ces deux ATC sont inférieures, en moyenne, à celles des ATC du site #10. On remarque en effet sur la Figure 5.7 que les données des ATC du site #5 se situent sous la régression et son intervalle de confiance. Dans ce cas-ci, la régression établie aurait tendance à surestimer le $\Delta T_{eau,max}$ de ces ATC.

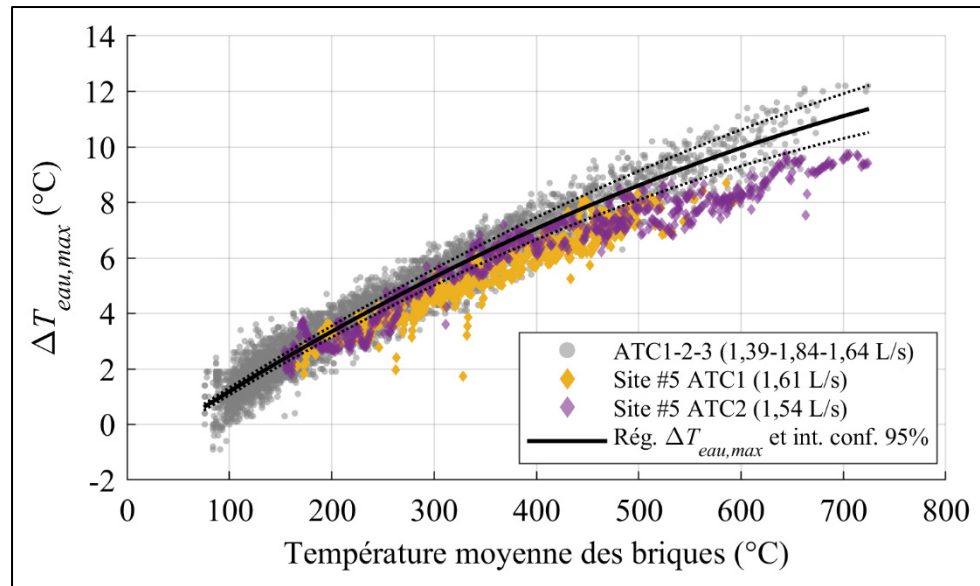


Figure 5.7 Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur pour des débits d'eau comparables à ceux des ATC du site #10 (lorsque $99\% \leq v_{vent} \leq 100\%$)

Étant donné que les débits d'eau et la température de l'eau à l'entrée des échangeurs sont similaires à ceux des ATC du site #10, un autre paramètre qui pourrait impacter $\Delta T_{eau,max}$ est les écarts de température entre les noyaux de briques. Ces écarts peuvent influencer sur l'estimation de la quantité d'énergie stockée (Q_{stock}) en calculant la moyenne des températures des noyaux. L'indice d'uniformité de température TUI des noyaux est calculé pour quantifier ces écarts par rapport à la température moyenne. La Figure 5.8 montre la répartition des valeurs de TUI calculées pour tous les points conservés des ATC des sites #5, 10 et 11. Cette figure montre que la température des noyaux est plus uniforme pour l'ATC2 du site #11 (TUI médian de 89%), ce qui devrait augmenter les transferts de chaleur successifs entre les briques, l'air et l'eau. Encore une fois, le débit d'eau circulant dans l'échangeur de cet ATC est le principal facteur qui limite sa puissance thermique maximale fournie. L'usage de cet ATC comme équipement de gestion de pointe liée au chauffage est par ailleurs similaire aux trois ATC du site #10 et à l'ATC2 du site #5. L'ATC1 du site #5 est quant à lui utilisé comme source principale de chauffage, donc soumis à des changements d'état plus fréquents entre charge seule et décharge seule, ainsi qu'à de la charge et de la décharge simultanées.

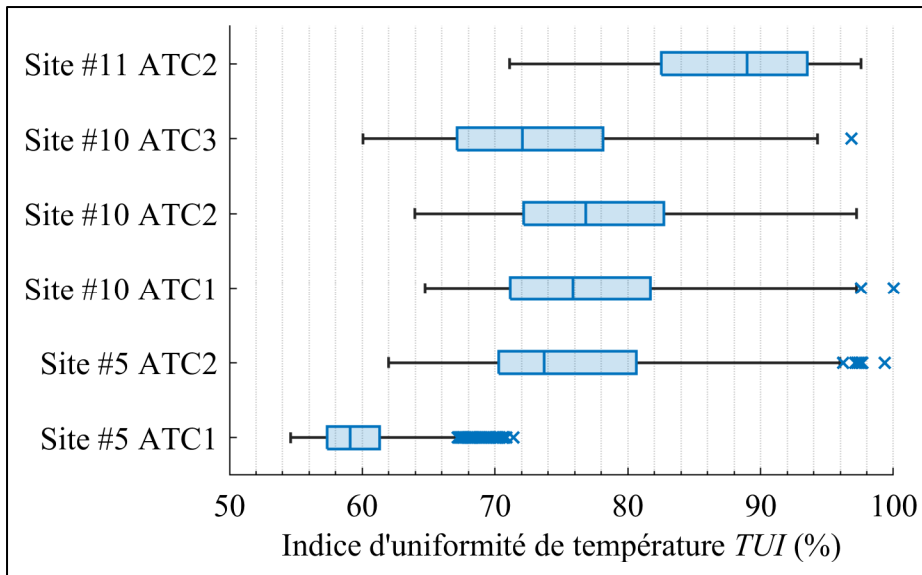


Figure 5.8 Indice d'uniformité de température des noyaux de briques des ATC des sites #5, #10 et #11

Certes, la Figure 5.8 ne présente que les données de décharge seule, mais l'ATC1 du site #5 a tout de même un TUI considérablement plus faible (TUI médian de 59%) que les autres utilisés comme équipements de gestion de pointe.³² La température du noyau du haut de cet ATC est typiquement inférieure à celle du noyau du milieu et du bas, ce qui réduit le TUI et le transfert de chaleur dans l'ATC, donc son $\Delta T_{eau,max}$. Le TUI à lui seul n'explique toutefois pas que les données de $\Delta T_{eau,max}$ de l'ATC2 du site #5 (TUI médian de 74%) montrent un écart marqué par rapport à celles des ATC du site #10 sur la Figure 5.7, alors qu'ils ont des TUI similaires. Cela réitère que la relation établie pour estimer $\Delta T_{eau,max}$ et $\dot{Q}_{D\acute{e}ch,max}$ ne s'applique pas à toutes les conditions d'opération. Le TUI est utilisé dans la littérature pour caractériser les systèmes de stockage thermique, mais il faudrait étudier d'autres indicateurs pour déterminer s'ils sont mieux adaptés aux ATC hydroniques. Le TUI ne tient par exemple pas compte de la position verticale d'un noyau à plus haute température, ce qui impacte le transfert de chaleur du haut de l'ATC vers le bas entre les briques et l'air. Aussi, les seules données d'opération disponibles

³² L'hypothèse d'éléments chauffants défaillants discutée à l'étape 3 de la méthode peut aussi contribuer à des écarts de température entre les noyaux de briques. Il n'a toutefois pas été possible de confirmer la défaillance d'éléments chauffants ni, le cas échéant, dans quels noyaux ils se trouvent.

sur le débit d'air circulant dans l'ATC sont les vitesses commandées (c.-à-d. les consignes) au moteur du ventilateur. Il n'a pas été possible de vérifier in situ que les débits d'air maximaux dans les ATC sont les mêmes. Des changements technologiques apportés au moteur du ventilateur mentionnés au paragraphe 1.2.2.4 pourraient influencer sur le débit d'air maximal.

5.3 Synthèse

Ce chapitre a permis d'établir une relation permettant d'estimer la capacité actuelle utilisable d'énergie stockée dans les briques de l'ATC hydronique de 80 kW. Pour ce faire, une régression entre le différentiel maximal de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur de chaleur en fonction de la température moyenne des briques a été établie. L'impact du débit d'eau et l'impact de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur ont été analysés lors de l'établissement de la relation. Cette relation a été exploitée, en plus des résultats tirés du Chapitre 4, pour proposer un gabarit de bilan d'énergie heure par heure de l'ATC à utiliser lors de la conception. Ce gabarit est présenté à l'Annexe X. Cet outil de conception vient en support au défi no. 3 de mise en œuvre identifié au Chapitre 3 qui n'avait pas été adressé dans les chapitres précédents. Ainsi, l'utilisation de cet outil lors de la conception s'ajoute aux bonnes pratiques à adopter.

Afin de discuter de l'applicabilité de la relation établie, les données d'autres ATC que ceux du site #10 ont été utilisées. Les conditions d'opération différentes de ces ATC ont permis de cerner certaines limites à la relation établie. Des efforts additionnels de collecte et d'analyse statistique de données d'opération mériteraient d'être déployés pour pallier ces limites.

Cette relation, dans sa forme actuelle ou modifiée, pourrait éventuellement servir à développer un modèle numérique de l'ATC hydronique afin de l'intégrer à des simulations énergétiques de systèmes CVCA. Aussi, en caractérisant la puissance thermique maximale que l'ATC peut fournir, cette relation peut faciliter la détection automatisée de défaillance de composants (p. ex. bris du moteur du ventilateur) ou de déficience d'opération (p. ex. débit d'eau anormalement faible). De tels outils contribueraient à faciliter la mise en œuvre de l'ATC.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de recherche était de faciliter la mise en œuvre de l'ATC hydronique dans le secteur institutionnel, en particulier dans les bâtiments de CSS. Un tel équipement de stockage thermique s'inscrit dans le contexte de transition énergétique du Québec, alors que les enjeux de gestion de la demande d'électricité en hiver sont amenés à s'accroître avec la décarbonation du chauffage et les « surplus » d'électricité qui s'amenuisent. Pour faire face à ces enjeux, l'ATC hydronique constitue une des options à considérer; encore faut-il le mettre en œuvre efficacement pour y parvenir. À ce titre, la revue de la littérature a mis en évidence des défis à relever lors de la mise en œuvre du stockage thermique, tant ceux qui sont communs à différents systèmes (p. ex. stockage de glace, d'eau glacée, ATC, etc.), que ceux spécifiques à l'ATC hydronique. Le Chapitre 3 a permis de cerner des défis à relever liés aux pratiques actuelles employées dans l'industrie et d'identifier les principales barrières qui subsistent, tant dans la littérature, que dans la documentation technique sur l'ATC hydronique. Les Chapitres 3 et 4 ont donné des exemples des impacts que cela engendre sur la performance actuelle. Les Chapitres 4 et 5 ont pour leur part contribué à pallier des caractéristiques sous-documentées de l'ATC hydronique, soient : le coefficient de déperditions thermiques effectif et la puissance thermique maximale pouvant être fournie dans diverses conditions d'opération. Dans l'ensemble, ce mémoire a fourni des pistes de réponses aux sous-questions de recherche énoncées dans l'introduction et a proposé des solutions aux barrières identifiées, telles que détaillées ci-après.

Tout d'abord, l'analyse des données extraites des entrevues présentée au Chapitre 3 a cerné les défis auxquels les intervenants impliqués lors de la mise en œuvre de l'ATC hydronique sont susceptibles d'être confrontés (sous-question 1.1). Le Tableau-A VI-1 présenté à l'Annexe VI répertorie ces défis. La plupart de ceux-ci sont liés à une expertise limitée et aux pratiques actuelles employées. L'implémentation tardive de séquences de contrôle robustes et les indications incomplètes sur les modes d'opération à préconiser de l'ATC hydronique accentuent ces défis. Cela soutient que la mise en œuvre de l'ATC hydronique, et plus globalement du stockage thermique, dans un contexte de transition énergétique du chauffage

de bâtiments existants exige une intégration des expertises, autant celle des concepteurs, des entrepreneurs, des opérateurs que du personnel de maintenance. Cette intégration est particulièrement importante lors d'une première expérience avec l'ATC. Pour améliorer les transitions entre la conception, la mise en service, l'opération et la maintenance, des bonnes pratiques à adopter ont été identifiées au Tableau 3.7 (sous-questions 1.2 et 3.2).

Le Chapitre 4 a détaillé la méthode d'analyse des données d'opération et mesurées qui a permis de mesurer la performance in situ d'ATC hydroniques (sous-question 2.1). Les indicateurs de performance suivants ont été quantifiés : l'impact sur la puissance électrique appelée du bâtiment, le rendement énergétique, l'impact sur les coûts d'énergie et de puissance, ainsi que l'impact sur les émissions de GES (sous-questions 1.3 et 2.2). Des pistes d'amélioration de la performance actuelle ont été identifiées, entre autres pour réduire les pertes thermiques (sous-question 3.1). Ce chapitre a en outre montré que le suivi étroit de l'opération est requis afin de maintenir ou améliorer la performance. Dans les pratiques actuelles documentées dans le Chapitre 3, ce suivi est difficile à effectuer avec les outils en place et les ressources limitées à y allouer. Le Chapitre 4 témoigne de tels suivis déficients (sous-questions 1.3 et 2.3). La méthode d'analyse des données d'opération utilisée dans ce chapitre, ainsi que plusieurs des figures présentées, pourraient être intégrées à un outil automatisé de suivi en continu de l'opération et de la performance, puisqu'elles ont démontré leur potentiel dans ce projet de recherche (sous-questions 3.1 et 3.3).

Le Chapitre 5 a proposé des solutions concrètes à adopter pour améliorer les pratiques actuelles de mise en œuvre (sous-question 3.2), soient : une fiche synthèse des tâches de maintenance préventive à effectuer présentée à l'Annexe V et un gabarit de bilan d'énergie de l'ATC hydronique de 80 kW présenté à l'Annexe X à utiliser lors de la conception.

Cette recherche présente des limites, qui ont été évoquées dans chaque chapitre. Elles touchent autant les données collectées, les résultats obtenus que les analyses qui en ont été tirées. Des recommandations sont donc formulées en vue de poursuivre les travaux de recherche liés à la mise en œuvre de l'ATC hydronique dans le secteur institutionnel.

RECOMMANDATIONS

À la lumière de ce projet de recherche, il est recommandé pour les travaux futurs de :

1. Effectuer des entrevues auprès de gestionnaires et de concepteurs qui hésitent à installer des ATC hydroniques afin de comparer leur perception des défis identifiés dans le cadre de ce projet (c.-à-d. avec des participants ayant une expérience passée). Cela permettrait du même coup d'encourager l'adoption de bonnes pratiques en amont de la mise en œuvre et, si possible, d'analyser l'effet qu'elles ont eu à la suite de l'installation.
2. Employer une méthode d'analyse plus approfondie de l'impact sur la demande d'électricité induit par l'ATC hydronique, par exemple en analysant la modification du profil temporel de demande, plutôt que le strict impact sur la demande maximale.
3. Collecter des données d'opération d'ATC hydroniques, idéalement selon un plan d'échantillonnage couvrant diverses conditions typiques, afin d'approfondir la caractérisation de la puissance thermique maximale pouvant être fournie. Le recours à des méthodes d'analyse statistique et de régression différentes de celles utilisées dans ce projet de recherche est aussi à considérer.
4. Développer un outil simplifié pour estimer les impacts énergétiques, économiques et sur les émissions de GES amenés par l'ATC hydronique afin d'outiller l'analyse préliminaire de faisabilité technico-économique.
5. Développer un modèle numérique de l'ATC pouvant être intégré à un logiciel de simulation énergétique des systèmes CVCA d'un bâtiment et qui permet de tester différentes stratégies de contrôle. Produire des études de cas afin de guider les choix de conception, autant pour les bâtiments existants que pour les nouveaux.
6. Développer un outil d'acquisition et de traitement en continu des données d'opération de l'ATC hydronique afin d'intégrer la détection et le diagnostic automatisés de défaillances ainsi que le suivi de la performance.
7. Reconsidérer les supports financiers (p. ex. tarifs d'électricité, subventions), techniques et technologiques (p. ex. stratégie de contrôle commune avec le service public) pouvant être offerts au secteur C&I pour appuyer la mise en œuvre du stockage thermique électrique à des fins de gestion de la demande et de décarbonation du chauffage.

ANNEXE I

FEUILLET D'INFORMATION 1



FEUILLET D'INFORMATION VOLET OPÉRATION & MAINTENANCE

PROJET DE RECHERCHE

TITRE :	Stockage thermique et Exemplarité de l'État
CHERCHEURE RESPONSABLE :	Katherine D'Avignon, Département de génie de la construction – École de technologie supérieure (ÉTS)
ÉTUDIANT :	Vincent Chabot, Étudiant à la maîtrise, Département de génie mécanique – ÉTS

Le présent projet de recherche vise à 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. Les constats établis par cette recherche contribueront, d'une part, à fournir aux gestionnaires de parcs immobiliers institutionnels des données probantes sur l'opération, la rentabilité et l'impact énergétique et environnemental des technologies de stockage thermique. D'autre part, l'expérience des gestionnaires impliqués dans les projets passés servira à documenter comment l'installation, l'opération et l'entretien de ces technologies furent vécus, à décrire les circonstances justifiant leur adoption et à extraire les conditions nécessaires pour assurer le succès de leur implémentation. Cette étude, effectuée en partenariat avec Transition énergétique Québec (TEQ) et le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES), permettra de mieux outiller les gestionnaires dans la transition vers une utilisation prioritaire de l'énergie renouvelable dans le parc immobilier institutionnel de l'État québécois.

PARTICIPATION

Par la présente, vous êtes invité(e) à participer à ce projet de recherche. Si après avoir lu le présent document, vous acceptez de participer au projet, nous vous demanderons de prendre part à une entrevue conduite par un membre de l'équipe de recherche. Les questions qui vous seront posées porteront sur l'opération et la maintenance des systèmes de stockage thermique dans le(s) bâtiment(s) de la commission scolaire qui participe à l'étude. Plus particulièrement, cette entrevue vise les accumulateurs thermiques électriques centralisés, communément appelés « ThermÉlect ». La durée de l'entrevue est estimée à 60 minutes. Cette entrevue sera enregistrée (ou filmée si l'usage de la vidéoconférence est favorisé) pour aider à la retranscription de vos réponses.

Votre participation est volontaire, ce qui signifie que vous êtes libre de refuser de participer. Vous pouvez mettre fin à votre participation en tout temps au cours de l'entrevue en avisant le membre de l'équipe de recherche. Aucune justification ne vous sera demandée. Une fois l'entrevue terminée, vous pourrez vous retirer du projet tant que la chercheure possédera la clé de correspondance qui permet de relier vos réponses à votre identité.

CONFIDENTIALITÉ

Les données recueillies dans le cadre de ce projet, y compris les enregistrements audio ou vidéo acquis durant l'entrevue, seront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Elles seront conservées par la chercheure principale de ce projet de recherche sur un serveur externe sécurisé pendant 5 ans.

Afin de préserver votre identité et la confidentialité de vos renseignements, un numéro de code vous sera attribué. La clé du code reliant votre nom à vos données sera conservée par la chercheuse responsable de ce projet de recherche.

Les données anonymisées extraites des entrevues pourront être publiées dans des rapports, des articles, faire l'objet de discussions scientifiques, ou être utilisées à des fins d'enseignement. Dans aucun de ces cas, il ne sera possible de vous identifier. Vous ne serez pas cité(e) directement dans aucune publication.

CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

Le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS a autorisé la conduite du présent projet de recherche. Pour toute question en lien avec vos droits en tant que participant(e) à la recherche, vous pouvez communiquer avec la coordonnatrice du comité d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure au **(514) 396-8800 poste 7807**.

PERSONNE-RESSOURCE

Si vous avez des questions ou besoin d'informations complémentaires au sujet du projet ou de votre participation, vous pouvez communiquer avec la professeure Katherine D'Avignon, chercheuse responsable du projet, par courriel à l'adresse katherine.davignon@etsmtl.ca, ou par téléphone au 514-396-8565.

ANNEXE II

FEUILLET D'INFORMATION 2



FEUILLET D'INFORMATION VOLET CONCEPTION

PROJET DE RECHERCHE

TITRE :	Stockage thermique et Exemplarité de l'État
CHERCHEUR(E) RESPONSABLE :	Katherine D'Avignon, Département de génie de la construction – École de technologie supérieure (ÉTS)
ÉTUDIANT(E) :	Vincent Chabot, Étudiant à la maîtrise, Département de génie mécanique – ÉTS

Le présent projet de recherche vise à étudier les technologies de stockage thermique actuellement déployées dans les bâtiments institutionnels québécois de façon à documenter l'expérience passée et en soutenir les conditions de succès. Les constats établis par cette recherche contribueront, d'une part, à fournir aux gestionnaires de parcs immobiliers institutionnels des données probantes sur l'opération, la rentabilité et l'impact énergétique et environnemental des technologies de stockage thermique. D'autre part, l'expérience des concepteurs impliqués dans les projets passés servira à documenter les objectifs visés, les circonstances justifiant d'inclure une technologie de stockage thermique dans leurs plans et les méthodes de dimensionnement et de contrôle-commande utilisées. L'expérience des concepteurs aidera à cerner les critères de succès du stockage thermique dans les bâtiments institutionnels. Cette étude, réalisée en partenariat avec Transition énergétique Québec (TEQ) et le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES), permettra de poursuivre efficacement la transition vers une utilisation prioritaire de l'énergie renouvelable dans le parc immobilier institutionnel de l'État québécois.

PARTICIPATION

Vous êtes invité(e) à participer à ce projet de recherche. Si, après avoir lu le présent document, vous acceptez de participer au projet, nous vous demanderons de prendre part à une entrevue conduite par un membre de l'équipe de recherche. Les questions qui vous seront posées porteront sur la conception de systèmes CVCA incluant des accumulateurs thermiques électriques. Plus particulièrement, cette entrevue vise les accumulateurs thermiques électriques centralisés, communément appelés « ThermÉlect ».

La durée de l'entrevue est estimée à 60 minutes. Cette entrevue sera enregistrée (ou filmée si l'usage de la vidéoconférence est possible) pour aider à la retranscription de vos réponses.

Votre participation est volontaire, ce qui signifie que vous êtes libre de refuser de participer. Vous pouvez mettre fin à votre participation en tout temps au cours de l'entrevue en avisant le membre de l'équipe de recherche. Aucune justification ne vous sera demandée. Une fois l'entrevue terminée, vous pourrez vous retirer du projet tant que la chercheuse possédera la clé de correspondance qui permet de relier vos réponses à votre identité.

CONFIDENTIALITÉ

Les données recueillies dans le cadre de ce projet seront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Elles seront conservées par la chercheuse principale de ce projet de recherche sur un serveur externe sécurisé pendant 5 ans.

Afin de préserver votre identité et la confidentialité de vos renseignements, un numéro de code vous sera attribué. La clé du code reliant votre nom à vos données sera conservée par la chercheuse responsable de ce projet de recherche.

Les enregistrements acquis durant l'entrevue seront conservés pour la durée du projet et seront détruits par la suite.

Les données anonymisées extraites des entrevues pourront être publiées dans des rapports, des articles, faire l'objet de discussions scientifiques, ou être utilisés à des fins d'enseignement. Dans aucun de ces cas, il ne sera possible de vous identifier. Vous ne serez pas cité(e) directement dans aucune publication.

PERSONNE(S)-RESSOURCE(S)

Si vous avez des questions ou besoin d'informations complémentaires au sujet du projet ou de votre participation, vous pouvez communiquer avec la professeure Katherine D'Avignon, chercheuse responsable du projet, par courriel à l'adresse katherine.davignon@etsmtl.ca, ou par téléphone au 514-396-8565.

ANNEXE III

QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE 1

Introduction

Le présent projet de recherche vise à 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. Cette étude est effectuée en partenariat avec Transition énergétique Québec (TEQ) et le Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES).

Objectifs de l'entrevue

L'entrevue a pour objectif d'inventorier les leçons apprises par les opérateurs du parc immobilier institutionnel liées à l'installation, l'opération et l'entretien d'accumulateurs thermiques électriques centralisés dans leur bâtiment.

Confidentialité

Nous tenons à vous rappeler que les données recueillies dans le cadre de ce projet seront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Les enregistrements ou vidéos acquis durant l'entrevue seront confidentiels. Les données extraites de ces entrevues, une fois rendues anonymes, pourront être publiées dans des rapports, des articles, faire l'objet de discussions scientifiques, ou être utilisées à des fins d'enseignement. Dans aucun de ces cas, il ne sera possible de vous identifier. Vous ne serez cité directement dans aucune publication. Vous pouvez mettre fin à votre participation en tout temps au cours de l'entrevue en avisant le membre de l'équipe de recherche.

Modalités et méthode

Les questions qui vous seront posées dans le cadre de cette entrevue porteront spécifiquement sur les leçons que vous avez apprises et qui sont liées à l'installation, l'opération et l'entretien d'accumulateurs thermiques. Nous tenons à vous rappeler que cette entrevue vise uniquement les accumulateurs thermiques électriques centralisés, communément appelés « ThermÉlect ».

Il est possible que cette technologie fût installée dans plusieurs bâtiments du centre de services scolaire. Essayez de répondre aux questions de façon à représenter ces projets dans l'ensemble. Il est aussi possible que les premiers projets auxquels vous avez participé impliquant les accumulateurs centralisés aient été très différents des suivants. Il est important pour nous de documenter cela. Nous voulons vous encourager à indiquer dans vos réponses si et comment votre perception et vos pratiques ont évolué dans le temps. Lorsque vous le souhaitez, vous pouvez compléter votre réponse en indiquant comment un cas particulier différait des autres. Si vous êtes prêts, nous allons commencer.

A – Informations générales :

QA1 : Dans combien de sites impliquant des accumulateurs thermiques électriques centralisés êtes-vous ou avez-vous personnellement été impliqué?

QA2 : Aviez-vous une expérience avec cette technologie avant de participer aux projets comme employé du centre de services scolaire?

QA3 : Quel est votre niveau d'implication / votre rôle pour chacun de ces sites?

B – Rentabilité :

QB1 : Savez-vous si une analyse de rentabilité a été réalisée avant l'installation de l'accumulateur?

QB2 : Si oui à QB1, est-ce que la période de retour sur investissement était un critère décisionnel essentiel pour aller de l'avant avec l'installation de l'accumulateur?

QB3 : Si oui à QB2, à combien d'années la période de retour sur investissement a-t-elle été évaluée et quelle était la période maximale acceptable?

QB4 : Est-ce que la rentabilité de l'accumulateur a été évaluée depuis son installation?

C – Exécution des travaux :

QC1 : Quelle est votre perception de l'expertise professionnelle disponible sur le marché en lien avec les accumulateurs thermiques (entrepreneurs, gens de métier, spécialiste en contrôle, en chauffage, etc.)?

QC2: Est-ce que les entrepreneurs auxquels vous avez fait appel étaient en mesure de programmer la stratégie de contrôle de l'accumulateur pour assurer son intégration au bâtiment?

QC3 : Si non à QC2, comment avez-vous procédé pour identifier des entrepreneurs pouvant le faire?

D – Mise en service :

QD1 : Avez-vous obtenu, de la part de certains de vos fournisseurs, des périodes de garantie prolongées et/ou des périodes d'assistance en exploitation afin d'assurer une bonne transition avec vos équipes de gestion des opérations sur le terrain?

QD2 : Est-ce que la mise en service et/ou le suivi d'après-vente a été traité différemment par les intervenants (professionnels et entrepreneurs) par rapport à des projets n'impliquant pas d'accumulateurs thermiques?

QD3 : Avez-vous eu des problèmes quelconques au niveau de l'opération des accumulateurs thermiques depuis leur mise en service?

QD4 : Si oui à QD3, de quelle nature (personnel, équipement, rendement, etc.)?

QD5 : Y a-t-il eu des changements apportés au niveau de l'opération ou du contrôle des accumulateurs thermiques depuis leur installation?

E - Entretien des bâtiments – Exigences particulières :

QE1 : Avez-vous une stratégie spécifique pour l'entretien des accumulateurs? Est-elle établie sur une base annuelle, mensuelle, ou sur une autre durée?

QE2 : Comment avez-vous établi cette stratégie d'entretien?

QE3 : Qui est chargé de l'entretien de ces appareils? Est-ce une personne de votre organisation ou une entreprise externe?

QE4 : Avez-vous remplacé certains composants des accumulateurs depuis leur installation? Comme l'isolant, les résistances électriques, le ventilateur, le panneau de contrôle, par exemple.

QE5 : Si oui à QE4, pour **chacun** des composants identifiés :

QE5a : Après combien de temps l'avez-vous remplacé?

QE5b : Est-ce que le remplacement était à titre préventif ou curatif?

QE5c : Quel est le coût en matériel lié au remplacement?

QE5d : À combien d'heures-hommes estimez-vous le temps nécessaire pour effectuer le remplacement?

QE6 : Comment qualifieriez-vous l'accessibilité aux composants de remplacement par rapport à d'autres systèmes de chauffage? Avez-vous eu de la difficulté à vous les procurer?

F- Questions générales :

QF1 : Quels changements se sont imposés, à ce jour, au niveau de la gestion des projets de stockage thermique depuis votre premier projet de cette nature?

QF2 : Quels sont, selon vous, les critères de succès de ces projets?

QF3 : Quelles sont les leçons apprises?

QF4 : Quelles sont vos recommandations?

Conclusion

C'était notre dernière question, l'entrevue est donc maintenant terminée. Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de participer à cette étude. Votre collaboration est grandement appréciée.

Si vous avez des questions ou besoin d'informations complémentaires au sujet du projet ou de votre participation, vous pouvez en tout temps communiquer avec la professeure D'Avignon.

Merci encore.

ANNEXE IV

QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE 2

Introduction

Le présent projet de recherche vise à 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. Cette étude est effectuée en partenariat avec Transition énergétique Québec (TEQ) et le Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES).

Objectifs de l'entrevue

L'entrevue a pour objectif de clarifier le processus de conception et les méthodes de dimensionnement employées dans des projets de rénovation de chaufferies institutionnelles québécoises. Les projets concernés sont notamment ceux pour lesquels des accumulateurs thermiques électriques centralisés ont été proposés aux Centres de services scolaires (CSS).

Confidentialité

Nous tenons à vous rappeler que les données recueillies dans le cadre de ce projet seront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Les enregistrements audio acquis durant l'entrevue seront confidentiels. Les données extraites de ces entrevues, une fois rendues anonymes, pourront être publiées dans des rapports, des articles, faire l'objet de discussions scientifiques, ou être utilisées à des fins d'enseignement. Dans aucun de ces cas, il ne sera possible de vous identifier. Vous ne serez cité directement dans aucune publication. Vous pouvez mettre fin à votre participation en tout temps au cours de l'entrevue en avisant le membre de l'équipe de recherche.

Modalités et méthode

Les questions qui vous seront posées dans le cadre de cette entrevue porteront spécifiquement sur les leçons que vous avez apprises et qui sont liées à la conception de projets qui

comprenaient des accumulateurs thermiques électriques centralisés, communément appelés « ThermÉlect ». Le questionnaire comprend trois parties; dans la première et la dernière partie, il vous sera demandé de répondre de façon à représenter ces projets dans l'ensemble, alors que les questions de la deuxième partie porteront sur des projets spécifiques auxquels vous avez participé. De plus, il est possible que les premiers projets auxquels vous avez participé impliquant des accumulateurs centralisés aient été très différents des suivants. Il est important pour nous de documenter cela. Nous vous encourageons à indiquer dans vos réponses si et comment votre perception et vos pratiques ont évoluées dans le temps. Lorsque vous le souhaitez, vous pouvez compléter votre réponse en indiquant comment un cas particulier différait des autres.

Si vous êtes prêts, nous allons commencer.

Partie 1 : Questions portant sur l'ensemble de vos projets avec stockage thermique

A – Informations générales :

QA1 : Dans combien de projets impliquant des accumulateurs thermiques électriques centralisés avez-vous ou êtes-vous personnellement impliqué?

QA2 : Aviez-vous une expérience avec cette technologie avant de participer à ces projets au sein de votre entreprise actuelle?

QA3 : Quel est votre niveau d'implication / votre rôle pour chacun de ces projets?

QA4 : De manière générale, comment se déroulent les projets de rénovation d'écoles dans votre entreprise? À quel moment votre implication dans ces projets débute et se termine?

Partie 2 : Questions portant sur certains de vos projets avec du stockage thermique

Projet(s) concerné(s) :

CSS, école, date de conception/construction

CSS, école, date de conception/construction

CSS, école, date de conception/construction

B - Mandat et objectifs :

QB1 : Pour ces projets spécifiques, quel était le mandat confié à votre entreprise? Quels étaient vos livrables au client?

QB1a : Identifier le type de projet et si AVEC/SANS garantie d'économies d'énergie :

- a. Rénovation majeure du bâtiment
- b. Mise à niveau de la salle mécanique
- c. Remplacement de certains équipements seulement

QB2 : Est-ce qu'il y avait des objectifs préétablis avec le client ou des contraintes particulières au niveau de la performance énergétique de ces projets?

QB3 : *Si oui à QB2*, quels étaient ces objectifs et contraintes?

Exemples d'objectifs (indiquer tous ceux applicables) :

- a) Réduction de la facture énergétique :
 - a. Toutes sources d'énergie confondues
 - b. Gaz naturel
 - c. Huile (mazout)
 - d. Propane
 - e. Électricité
 - f. Vapeur
 - g. Autre source :
- b) Réduction de la pointe de demande d'électricité
- c) Réduction des émissions de GES
- d) Participation à un programme de subvention :
 - a. Nom de l'organisme subventionnaire :
 - b. Nom du programme :
 - c. Critère principal pour participer :
- e) Projet avec certification (LEED, BOMA, etc.) :
 - a. Certification :
 - b. Niveau visé/obtenu :

Exemples de contraintes (indiquer toutes celles applicables) :

- a) Équipements qui devaient être remplacés et pour quelle(s) raison(s) :
- b) Équipements qui devaient être conservés et pour quelle(s) raison(s) (ex : chaudière à l'huile comme source d'appoint, de dépannage en cas de panne/bris, etc.) :
- c) Période de rentabilité/retour sur investissement ciblée :
- d) Montant minimal/maximal alloué au projet pour pouvoir participer au programme de subvention :

C - Conception et dimensionnement :

QC1 : Quels critères ont été considérés dans ces projets pour prendre la décision d'aller de l'avant avec la technologie de stockage thermique? (Indications du type *Go/No-go*)

QC2 : Comment la conception de ces projets avec accumulateurs thermiques diffère-t-elle des projets qui n'en comportent pas?

QC3 : Quels outils ou méthodes (logiciels, normes, guides de conception) avez-vous utilisés pour déterminer la capacité de stockage thermique requise? (Exemples : logiciel, norme, guide de conception, modèle numérique/simulation de l'accumulateur)

QC3a : Selon quel paramètre le nombre d'accumulateurs thermiques installés a-t-il été déterminé?

QC4 : Est-ce qu'il aurait été pertinent pour votre conception de faire une simulation énergétique du bâtiment avec un accumulateur ou d'utiliser un modèle numérique de l'accumulateur?

QC5 : Qu'est-ce qui a déterminé l'emplacement sur le réseau de tuyauterie hydronique où l'accumulateur est raccordé? (en parallèle des autres équipements de chauffage, au retour d'eau chaude/avant les autres équipements hydroniques, juste avant l'alimentation/après les autres équipements hydroniques)

- a) Contraintes d'espace, géométriques
- b) Emplacement de l'ancien équipement qui a été remplacé
- c) La tuyauterie existante n'a pas été remplacée/modifiée
- d) Autres considérations :

QC5a : Quelle configuration est la plus optimale et donne les meilleures performances selon votre expérience?

D - Contrôle

QD1 : En quoi consistait la stratégie de contrôle des accumulateurs thermiques?

Éléments de la stratégie de contrôle :

- a) Autorisation de la charge de l'accumulateur :
 - i. Horaire journalier de charge (heure de début/fin de la charge à chaque jour) :
 - ii. L'autorisation de charge dépend-elle d'une information sur la puissance électrique disponible?

- iii. Températures extérieures à partir desquelles la charge de l'accumulateur est autorisée (automne) et bloquée (printemps) :
- b) Niveau de charge de l'accumulateur :
 - i. Est-ce que le niveau de charge ciblé est modulé ou il est toujours à 100%?
 - ii. Qu'est-ce qui permet de déterminer le niveau de charge ciblé?
 - a. La température extérieure actuelle
 - b. La température prévue pour les prochaines X heures :
 - c. Une valeur de niveau de charge préétablie pour le mois en cours
 - d. La puissance électrique disponible au niveau du bâtiment/compteur
 - e. Autre :
 - iii. Comment ce niveau de charge ciblé est communiqué à l'accumulateur?
 - iv. Qu'est-ce qui détermine la limite de puissance électrique pour la charge de l'accumulateur?
 - a. Limite ponctuelle, basée sur la demande électrique actuelle
 - b. Limite basée sur les X dernières heures
 - c. Limite basée sur la dernière journée
 - d. Autre :
- c) Autorisation de la décharge de l'accumulateur :
 - i. Horaire journalier de décharge (heure de début/fin de décharge à chaque jour) :
 - ii. Est-ce que la charge et la décharge sont permises en même temps? Pourquoi?
- d) Paramètres de décharge de l'accumulateur :
 - i. Qu'est-ce qui détermine l'arrêt/départ de la pompe de l'accumulateur? (si la pompe n'est pas toujours en marche)
 - ii. Vitesse du ventilateur : est-elle modulée selon le besoin, la valeur maximale est-elle limitée?
- e) Informations lues par le système de gestion du bâtiment :
 - i. Est-ce que le système de gestion du bâtiment prend une lecture de la puissance appelée de l'accumulateur ou c'est une valeur calculée à partir d'autres paramètres (ex : le nombre d'éléments chauffants en marche)?
 - ii. Est-ce que le système de gestion du bâtiment est relié au compteur d'électricité?

QD2 : Comment cette stratégie de contrôle des accumulateurs thermiques a-t-elle été élaborée?

QD2a : Est-ce que la stratégie de contrôle des accumulateurs thermiques diffère d'un projet/client à l'autre?

QD3 : Quelles interactions y a-t-il entre le développement de la stratégie de contrôle des accumulateurs et l'aspect dimensionnement/conception de ceux-ci? Autrement dit, quels éléments de contrôle influencent la conception, et vice-versa?

QD4 : Quels éléments de la stratégie de contrôle avez-vous changés au fil des projets réalisés?

E - Coûts de conception et d'installation :

QE1 : Quels étaient approximativement les coûts d'achat et d'installation des accumulateurs thermiques électriques centralisés dans ces projets?

QE2 : Selon votre expérience, est-ce que vous pensez que ces projets avec accumulateurs thermiques ont un surcoût lié à la conception par rapport à des projets similaires où le stockage thermique n'est pas retenu?

QE3 : Quel est votre avis sur les coûts de mise en service au niveau du contrôle de l'appareil, y a-t-il un surcoût à ce niveau?

QE4 : *Si oui à QE2 et/ou QE3*, d'où vient ce surcoût et à combien l'évaluez-vous?

F – Rentabilité :

QF1 : Est-ce que c'était dans votre mandat ou dans celui d'un collègue de votre entreprise d'évaluer la rentabilité d'un accumulateur thermique?

QF2 : Est-ce que la période de retour sur investissement était un critère décisionnel essentiel pour aller de l'avant pour proposer au client d'installer un accumulateur?

QF3 : *Si oui à QF1 et/ou QF2*,

QF3a : À combien d'années la période de retour sur investissement a-t-elle été évaluée et quelle était la période maximale acceptable?

QF3b : Quelle est la durée de vie de l'accumulateur qui a été considérée dans l'analyse de rentabilité?

QF3c : Comment cette analyse de rentabilité a influencé votre conception? Qu'est-ce qui permet de maximiser la rentabilité d'installer un accumulateur thermique?

QF3d : Quel est votre avis sur l'entretien requis de l'accumulateur? Est-ce comparable à d'autres équipements CVCA selon vous?

QF4 : *Si non à QF1*, quel est votre avis sur la durée de vie de l'accumulateur et sur l'entretien requis?

QF4a : Est-ce comparable à d'autres équipements de CVCA selon vous?

QF5 : Est-ce que vous savez si la rentabilité de l'accumulateur a été réévaluée après son installation, soit par vous, par un collègue de votre entreprise ou par le client?

G - Mise en service

QG1 : Est-ce que vous savez s'il y a eu des changements apportés à ce qui était prévu dans les plans et devis lors de la mise en service des équipements? (Exemple : ajout d'un système d'évacuation d'air pour rafraîchir la salle mécanique)

H – Opération et maintenance

QH1 : Est-ce que vous avez été appelé à travailler sur des problématiques liées à l'opération ou à l'entretien des accumulateurs thermiques après leur mise en service?

QH2 : *Si oui à QH1*, quelles étaient les problématiques rencontrées?

QH2a: Quelles solutions ont été proposées / apportées?

QH3 : Est-ce que vous avez travaillé sur des projets de démantèlement d'accumulateurs thermiques et leur remplacement?

I - Autres questions spécifiques aux projets identifiés

QI1 : *(à définir, si requis, selon les questions spécifiques à poser)*

Partie 3 : Questions portant sur l'ensemble de vos projets avec du stockage thermique**J – Exécution des travaux :**

QJ1 : Quelle est votre perception de l'expertise professionnelle liée aux accumulateurs thermiques qui est disponible sur le marché, que ce soit au niveau des représentants, des entrepreneurs, des corps de métier, des spécialistes en contrôle, etc.?

K - Leçons apprises et recommandations :

QK1 : Quels changements se sont imposés, à ce jour, au niveau de la gestion ou de la conception des projets de stockage thermique depuis votre premier projet de cette nature?

QK2 : Quels sont, selon vous, les critères de succès de ces projets?

QK3 : Quelles sont les leçons apprises?

QK4 : Quelles sont vos recommandations pour des concepteurs, des chargés de projet ou des gestionnaires de bâtiments?

Conclusion

C'était notre dernière question, l'entrevue est donc maintenant terminée. Je tiens à vous remercier d'avoir accepté de participer à cette étude. Votre collaboration est grandement appréciée.

Si vous avez des questions ou besoin d'informations complémentaires au sujet du projet ou de votre participation, vous pouvez en tout temps communiquer avec la professeure D'Avignon. Merci encore.

ANNEXE V

FICHE SYNTHÈSE : TÂCHES DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE

Cette fiche synthétise les tâches recommandées de maintenance préventive à effectuer sur l'ATC hydronique. Elle est divisée en deux parties : 1) les tâches basées sur les résultats et les analyses présentées au Chapitre 3 qui n'apparaissent pas dans la documentation actuelle du fabricant et 2) les tâches indiquées dans la plus récente documentation du fabricant (Steffes, s.d.d) qui sont étroitement liées aux remplacements curatifs documentés au Chapitre 3. Il est à noter que cette fiche apparaît à l'annexe 2 du Rapport technique (D'Avignon, 2022, pp. 71-72). Des modifications mineures y ont été apportées pour l'intégrer à ce mémoire.

PARTIE 1

1.1 Une fois par année, lorsque l'ATC n'est pas en marche, effectuer les tâches suivantes :

- 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 μ F (Steffes, s.d.d, p. 3.07). 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 de relais SSR :
 - Resserrer les connexions électriques.
 - Inspecter l'état des câbles, des relais électromécaniques, des relais 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 V-3. Pour une vérification plus approfondie, suivre la procédure recommandée par le fabricant décrite plus loin dans cette fiche.
- Pompe :
 - Nettoyer les filtres à tamis.
 - Vérifier l'état de lubrification et d'étanchéité des joints.

1.2 Au démarrage de l'ATC pour la saison de chauffage, effectuer les tâches suivantes :

- Moteur du ventilateur et pompe :
 - Vérifier le démarrage du ventilateur et de la pompe pendant la décharge.
- Panneau électrique et panneau de relais SSR :
 - Utiliser un détecteur infrarouge (p. ex. caméra thermique, 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 d'attente. 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 aux canaux RLoc137 à 139. Les voltages mesurés devraient être proches des valeurs spécifiées par le fabricant et répertoriées dans le Tableau-A V-1.

Tableau-A V-1 Voltages attendus des thermocouples
Adapté de Steffes (s.d.d, p. A.11)

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

1.3 Remplacements de composants à prévoir :

Les remplacements curatifs récurrents discutés dans la sous-section 3.3.2 et qui concernent des ATC hydroniques utilisés comme **source principale de chauffage** indiquent d'anticiper le remplacement de ces composants après approximativement 2 à 3 années :

- moteur du ventilateur (~500-1 000\$),
- condensateur du moteur de ventilateur (~10\$),
- fusibles (coût nd).

PARTIE 2

2.1 Tâches recommandées par le fabricant à effectuer chaque année :

- Température maximale autorisée des briques :
 - Vérifier la valeur du canal CLoc040. La valeur par défaut est 827°C et le fabricant indique de ne pas utiliser une température supérieure à cette valeur (Steffes Corporation, s.d.a). Le fabricant suggère 760°C pour une utilisation comme source principale de chauffage et 704°C pour une utilisation de gestion de pointe uniquement. Réduire cette valeur peut augmenter la durée de vie des éléments chauffants (Steffes Corporation, s.d.b).
- Éléments chauffants :
 - Vérifier l'état des éléments chauffants en suivant la procédure proposée par le fabricant, soit :
 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 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'ATC, aux canaux CLoc147 à 149 et peut être communiqué via BACnet™ au BMS.
 2. Mesurer le courant électrique appelé par l'ATC entre chacune des phases. Noter la valeur et la comparer à la valeur nominale présentée au Tableau-A V-2

Tableau-A V-2 Courant total appelé par les éléments chauffants des trois noyaux de briques
Adapté de Steffes (s.d.d, p. A.01-A.02)

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'ATC.
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 sont présentées dans le Tableau-A V-3. Noter la présence d'éléments défectueux et leur noyau (haut, milieu, bas).
9. Remettre le panneau en place et rétablir l'alimentation électrique de l'ATC.

Tableau-A V-3 Résistance électrique attendue des éléments chauffants
Adapté de Steffes (2016, p. 2)

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

- 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.

2.2 Autres tâches recommandées par le fabricant à effectuer chaque année :

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

ANNEXE VI

SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX DÉFIS À RELEVER

Cette annexe présente, aux pages qui suivent, le Tableau-A VI-1 qui synthétise les défis à relever qui ont été identifiés par l'analyse des données extraites des entrevues présentée dans le Chapitre 3. Dans ce tableau, les cases en grises correspondent aux six défis potentiels à relever lors de la mise en œuvre d'un système de stockage thermique qui sont tirés de la revue de la littérature. Les principales barrières à ces défis, qui sont rédigées spécifiquement pour les installations d'ATC hydroniques couvertes par les entrevues, sont indiquées dans le tableau. Finalement, la même terminologie que celle du Chapitre 3 est utilisée pour désigner les phases de la mise en œuvre, soit : « C » pour la conception, « O » pour l'opération et « M » pour la maintenance.

Tableau-A VI-1 Liens entre les principaux défis à relever identifiés à partir des entrevues et ceux tirés de la revue de la littérature

Phases	Défis identifiés	Barrières principales
1. Définir clairement l'utilisation visée du système de stockage thermique et à quel besoin il répond puisqu'il peut convenir à une application, mais pas à une autre.		
C	Transmettre clairement l'intention de conception au client et à la firme en contrôle avant la mise en service de l'ATC (c.-à-d. : quelle est l'utilisation visée, à quel besoin répond-il, quels éléments n'ont pu être définis/validés dans la séquence?).	Difficulté à transmettre l'intention de conception à la firme en contrôle et aux opérateurs, particulièrement ce qu'ils doivent définir/ajuster dans la séquence proposée, pour que la mise en service mène rapidement à opérer l'ATC comme prévu et atteindre les bénéfices visés.
O, M	Cerner l'impact des conditions d'opération de l'ATC sur la durée de vie de ses composants (p. ex. moteur du ventilateur, éléments chauffants). Identifier les modes d'opération à préconiser pour maximiser leur durée de vie, tout en desservant les besoins thermiques et en gérant la demande.	Les indications sur l'opération à préconiser de l'ATC, tant dans la documentation du manufacturier, dans les devis que dans les alertes affichées dans le BMS sont incomplètes : elles n'avertissent pas clairement l'opérateur des impacts potentiels de modifier l'opération sur la durée de vie des composants.
2. Établir le profil de besoins thermiques à combler avec des données mesurées ou simulées ayant une résolution suffisante pour inclure des variations journalières et saisonnières.		
C	Incertitude des concepteurs sur leurs estimations du profil de besoins thermiques à combler, qui doit être établi à partir de factures mensuelles d'énergie.	Difficulté d'avoir des données aux 15 min, 30 min, 1 h pour estimer les besoins thermiques à combler, surtout pour une réfection de chaufferie existante qui n'inclut pas de modélisation énergétique du bâtiment.
3. Évaluer la capacité du système de stockage thermique à fournir de la puissance et de l'énergie thermiques pour combler les besoins.		
C	Adapter les méthodes de dimensionnement conventionnelles, p. ex. pour une chaudière qui ne considèrent que la puissance maximale à combler, pour considérer aussi l'énergie à stocker au préalable dans l'ATC.	Absence d'information probante sur la puissance thermique que l'ATC peut fournir dans diverses conditions d'opération. Incertitude élevée sur la puissance électrique disponible pour charger l'ATC et sur la puissance de délestage à fixer.

Tableau-A VI-1 Liens entre les principaux défis à relever identifiés à partir des entrevues et ceux tirés de la revue de la littérature (suite)

Phases	Défis identifiés	Barrières principales
4. Justifier l'installation du système de stockage thermique en quantifiant les bénéfices qui pourront ou qui ont été atteints.		
C	Spécifier aux plans et devis ce qui doit être implanté dès la mise en service, particulièrement en contrôle, pour atteindre les bénéfices visés. Évaluer le travail que représente la mise en œuvre et le rodage du contrôle de l'ATC.	Incertitude quant à la complexité d'opérer adéquatement l'ATC pour atteindre les bénéfices visés. Méconnaissance des éléments à mettre en place pour atteindre les bénéfices visés (p. ex. anticiper les besoins de chauffage, alertes affichées sur l'interface du BMS).
O	Effectuer le suivi de l'opération et de la performance de l'ATC avec les outils actuellement mis en place.	Les outils utilisés (p. ex. BMS, factures mensuelles d'énergie) pour faire ce suivi permettent difficilement de s'assurer que les bénéfices visés sont atteints, ce qui mène p. ex. à des vérifications manuelles pour détecter un problème et à de l'essais et erreurs pour ajuster la courbe de consigne de température des briques.
5. Implanter des séquences de contrôle robustes dès la mise en service.		
C	Élaborer une séquence de contrôle spécifique au bâtiment et qui est suffisamment détaillée pour faciliter la mise en service et le rodage. Considérer la nature prévisionnelle du contrôle de l'ATC lors de l'élaboration de cette séquence (p. ex. anticiper ce qui peut empêcher le fonctionnement normal de la charge et de la décharge).	Les séquences spécifiées sont partielles. L'opérateur, à qui revient parfois la tâche de rodage, n'a pas toute l'information et les outils pour le faire. Le manque de données sur l'appel de puissance électrique du bâtiment, sur les besoins thermiques à combler, sur la puissance thermique que l'ATC peut fournir, ainsi que des ambiguïtés dans la documentation sur le contrôleur de l'ATC empêchent d'élaborer une séquence spécifique pouvant être implantée plus efficacement.
O	Ajuster les séquences de contrôle de l'ATC durant la période de rodage, en fonction des particularités de chaque bâtiment.	Les pratiques actuelles ne mettent pas d'emphasis particulière sur l'élaboration de séquences détaillées lors de la conception et sur leur validation lors de la mise en service. Les séquences doivent être adaptées à la nature prévisionnelle du contrôle de l'ATC pour p. ex. gérer des situations empêchant la charge ou la décharge. L'opération de l'ATC (p. ex. consigne de température des briques) doit aussi être ajustée en fonction des besoins à combler.

Tableau-A VI-1 Liens entre les principaux défis à relever identifiés à partir des entrevues et ceux tirés de la revue de la littérature
(suite)

Phases	Défis identifiés	Barrières principales
6.	Prévoir les ressources à allouer pour l'inspection, au besoin le remplacement, des composants les plus sujets à défaillir (p. ex. pompes, moteurs, capteurs) lors de la maintenance préventive.	
M	Adopter tôt des pratiques de maintenance préventive et d'inspection sur les ATC.	Ressources limitées à allouer. Ambiguïté des tâches à exécuter. Pas d'affichage automatisé de défaillance sur l'interface du BMS.

ANNEXE VII

CALCULS D'INCERTITUDES

Cette annexe présente les calculs d'incertitudes sur les paramètres énergétiques et indicateurs de performance suivants de l'ATC :

1. Puissance thermique fournie,
2. Énergie thermique fournie,
3. Puissance électrique appelée,
4. Énergie électrique consommée,
5. Pertes thermiques instantanées,
6. Pertes thermiques saisonnières,
7. Bilans d'énergie instantanés et saisonnier,
8. Rendement énergétique.

L'équation (A VII-1) est utilisée pour quantifier ces incertitudes. Cette équation est tirée du « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » du *Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM/WG 1) (2008). Cette équation permet d'évaluer la propagation des incertitudes (u) de chacun des paramètres x_n sur l'incertitude (u_c) de la variable d'intérêt y . Les paramètres x_n sont ceux requis pour calculer la variable y . L'incertitude combinée u_c sur la variable y est donc la somme du produit de la dérivée partielle et de l'incertitude de chaque paramètre x_n . Dans ce qui suit, cette équation générale est adaptée à chaque équation permettant de calculer les variables d'intérêt (c.-à-d. qu'on substitue y et x_n), à commencer par la puissance thermique fournie par l'ATC.

$$u_c^2(y) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial y(x_n)}{\partial x_n} \right)^2 \cdot u^2(x_n) \quad (\text{A VII-1})$$

Adaptée de JCGM/WG 1 (2008, p. 19)

1. Puissance thermique fournie

La puissance thermique fournie par l'ATC ($\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}$) est calculée avec l'équation (4.3). On quantifie l'incertitude sur cette puissance uniquement aux instants où l'ATC a l'autorisation de se décharger ($AutD\acute{e}ch_i = 1$) et que la vitesse commandée au moteur du ventilateur est non nulle ($v_{vent,i} > 0$). En adaptant l'équation générale (A VII-1) par substitution des paramètres x_n et de leurs incertitudes $u(x_n)$ permettant de calculer $\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}$, on obtient l'équation (A VII-2) qui permet de calculer l'incertitude sur la puissance thermique fournie, soit $u_c(\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i})$.

$$Si (AutD\acute{e}ch)_i = 1 \text{ et } v_{vent,i} > 0 : u_c(\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}) = \left[\left(\rho C_p (RLoc114_i - CLoc014 - T_{in,ATC,i}) \right)^2 \cdot u^2(\bar{V}) \right]^{\frac{1}{2}} + \left(\bar{V} \rho C_p \right)^2 \cdot \left(u^2(RLoc114_i) + u^2(T_{in,ATC,i}) \right) \quad (A VII-2)$$

$$Sinon : u_c(\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}) = 0$$

Le Tableau-A VII-1 présente la valeur nominale et l'incertitude considérée de chaque variable nécessaire pour calculer la puissance thermique fournie. Les valeurs nominales correspondent à la valeur moyenne pour la période d'hiver. Ainsi, l'incertitude moyenne sur la puissance thermique fournie, soit ± 4 kW pour l'ATC1 et ± 5 kW pour les ATC2 et 3.

Tableau-A VII-1 Valeurs nominales et incertitudes considérées sur les variables requises pour calculer la puissance thermique fournie

Variable	ATC	Valeur nominale	Incertitude	Unités
\bar{V}	1	1,39	$\pm 0,08$	L/s
	2	1,84	$\pm 0,06$	
	3	1,64	$\pm 0,02$	
ρ	1,2,3	0,975	s. o.	kg/L
C_p	1,2,3	4,1934	s. o.	kJ/kg·K
$RLoc114_i$	1	77	$\pm 0,5$	°C
	2,3	74		
$CLoc014$	1	2	s. o.	s. o.
	2,3	0		
$T_{in,ATC,i}$	1,2,3	70,7	$\pm 0,5$	°C
$\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}$	1	s. o.	± 4	kW
	2,3	s. o.	± 5	kW

L'incertitude sur le débit moyen correspond à l'écart-type des mesures. Aucune incertitude n'est considérée sur la densité et la capacité thermique massique de l'eau ni sur la valeur de CLoc014. Les incertitudes sur les sondes de température de l'eau sont estimées à $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

2. Énergie thermique fournie

L'énergie thermique fournie par l'ATC durant la période d'hiver ($Q_{D\acute{e}ch,hiver}$) est calculée avec l'équation (4.4). En adaptant l'équation générale (A VII-1) par substitution des paramètres x_n et de leurs incertitudes $u(x_n)$ permettant de calculer $Q_{D\acute{e}ch,hiver}$, on obtient l'équation (A VII-3) permettant de calculer l'incertitude sur l'énergie thermique fournie pendant la période d'hiver, soit $u_c(Q_{D\acute{e}ch,hiver})$. On considère une incertitude sur le pas de temps, $u(\Delta t)$, de $\pm 7,5$ minutes, soit la moitié du pas de temps de 15 minutes.

$$u_c(Q_{D\acute{e}ch,hiver}) = \left[\sum_{i=1}^N u^2(Q_{D\acute{e}ch,i}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-3})$$

$$\text{Où } u^2(Q_{D\acute{e}ch,i}) = (\Delta t \cdot u(\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i}))^2 + (\dot{Q}_{D\acute{e}ch,i} \cdot u(\Delta t))^2$$

L'incertitude sur l'énergie thermique fournie pendant la période d'hiver est de : ± 200 kWh pour l'ATC1, ± 300 kWh pour l'ATC2 et de ± 200 kWh pour l'ATC3.

3. Puissance électrique appelée

La puissance appelée par l'ATC ($P_{Ch,i}$) est calculée avec les équations (4.5) à (4.7). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient l'équation (A VII-4) qui permet de calculer l'incertitude sur cette puissance, soit $u_c(P_{Ch,i})$. On calcule cette incertitude uniquement aux instants où l'ATC a l'autorisation de se charger ($AutCh_i = 1$).

$$u_c(P_{Ch,i}) = (Nb \text{ Noyaux } Ch)_i \cdot \left[P_{Noyau}^2 \cdot u^2(MOD_i) + MOD_i^2 \cdot u^2(P_{Noyau}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-4})$$

Le Tableau-A VII-2 présente la valeur nominale et l'incertitude considérée de chaque variable nécessaire pour calculer la puissance électrique appelée. Aucune incertitude n'est considérée

sur le nombre de noyaux en charge. Ainsi, on suppose que tous les éléments chauffants sont mis sous tension par l'ATC et qu'ils sont tous fonctionnels. La valeur nominale de modulation de puissance (MOD_i) correspond à la valeur moyenne de la période d'hiver. L'incertitude considérée sur cette variable est de $\pm 2\%$. La puissance nominale d'un noyau et l'incertitude sur celle-ci sont tirées des spécifications du manufacturier (Steffes, 2016). L'incertitude moyenne sur la puissance appelée par chaque ATC vaut ± 2 kW.

Tableau-A VII-2 Valeurs nominales et incertitudes considérées sur les variables requises pour calculer la puissance électrique appelée

Variable	ATC	Valeur nominale	Incertainde	Unités
$(Nb\ Noyaux\ Ch)_i$	1,2,3	3	s. o.	s. o.
MOD_i	1	34,4	± 2	%
	2	35,6		
	3	38,7		
P_{Noyau}	1,2,3	26,7	$\pm 1,3$	kW
$P_{Ch,i}$	1,2,3	s. o.	± 2	kW

4. Énergie électrique consommée

L'énergie électrique consommée par l'ATC durant la période d'hiver est calculée avec l'équation (4.8). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient l'équation (A VII-5) qui permet de calculer l'incertitude sur l'énergie électrique consommée durant la période d'hiver, soit $u_c(E_{Ch,hiver})$. L'incertitude considérée sur le pas de temps, $u(\Delta t)$, est de $\pm 7,5$ minutes.

$$u_c(E_{Ch,hiver}) = \left[\sum_{i=1}^N u^2(E_{Ch,i}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-5})$$

$$\text{Où } u^2(E_{Ch,i}) = (\Delta t \cdot u(P_{Ch,i}))^2 + (P_{Ch,i} \cdot u(\Delta t))^2$$

L'incertitude sur l'énergie électrique consommée pendant la période d'hiver est de ± 300 kWh pour chacun des ATC.

5. Pertes thermiques instantanées

Les pertes thermiques instantanées des ATC ($\dot{Q}_{pertes,i}$) sont calculées avec l'équation (4.12). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient l'équation (A VII-6) qui permet de calculer l'incertitude sur celles-ci, soit $u_c(\dot{Q}_{pertes,i})$.

$$u_c(\dot{Q}_{pertes,i}) = \frac{1}{1\,000} \left[\frac{(\bar{T}_{briques,i} - T_{amb})^2 \cdot u^2((\overline{UA})_{effectif})}{+(\overline{UA})_{effectif}^2 \cdot u^2(\bar{T}_{briques,i})} \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-6})$$

Le Tableau-A VII-3 présente la valeur nominale et l'incertitude considérée de chaque variable nécessaire pour calculer les pertes thermiques instantanées. La valeur nominale de coefficient de déperditions thermiques effectif et la valeur nominale de température des briques correspondent aux valeurs moyennes de la période d'hiver. L'incertitude sur le coefficient de déperditions thermiques effectif correspond à l'écart-type des valeurs calculées qui a été indiqué dans le Tableau 4.14. On considère une incertitude de $\pm 2^\circ\text{C}$ sur la température moyenne des briques. On ne considère pas d'incertitude sur la température ambiante de la salle mécanique. L'incertitude moyenne sur les pertes thermiques instantanées vaut ± 1 kW pour chacun des ATC.

Tableau-A VII-3 Valeurs nominales et incertitudes considérées sur les variables requises pour calculer les pertes thermiques instantanées

Variable	ATC	Valeur nominale	Incertaince	Unités
$(\overline{UA})_{effectif}$	1	6,1	±3	W/K
	2	7,3		
	3	7,2		
$\bar{T}_{briques,i}$	1	376	±2	°C
	2	220		
	3	226		
T_{amb}	1,2,3	23	s. o.	°C
$\dot{Q}_{pertes,i}$	1,2,3	s. o.	±1	kW

6. Pertes thermiques saisonnières

Les pertes thermiques saisonnières de l'ATC sont calculées avec l'équation (4.13). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient l'équation (A VII-7) qui permet de calculer l'incertitude sur celles-ci, soit $u_c(Q_{pertes,hiver})$. L'incertitude considérée sur le pas de temps, $u(\Delta t)$, est de $\pm 7,5$ minutes.

$$u_c(Q_{Pertes,hiver}) = \left[\sum_{i=1}^N u^2(Q_{Pertes,i}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-7})$$

$$\text{Où } u^2(Q_{Pertes,i}) = (\Delta t \cdot u(\dot{Q}_{Pertes,i}))^2 + (\dot{Q}_{Pertes,i} \cdot u(\Delta t))^2$$

L'incertitude sur les pertes thermiques saisonnières vaut ± 50 kWh pour chacun des ATC.

7. Bilans d'énergie instantanés et saisonnier

Les bilans d'énergie instantanés (c.-à-d. bilan lorsque l'ATC est en attente, en charge ou en décharge) et saisonnier sont calculés avec les équations (4.14) et (4.15). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient les équations (A VII-8) à (A VII-11) qui permettent respectivement de calculer les incertitudes sur le bilan d'énergie instantané lorsque l'ATC est en attente $u_c(Bilan_{Att,i})$, le bilan d'énergie instantané lorsque l'ATC est en charge $u_c(Bilan_{Ch,i})$, le bilan d'énergie instantané lorsque l'ATC est en décharge $u_c(Bilan_{Déch,i})$ et le bilan d'énergie saisonnier $u_c(Bilan_{hiver})$.

$$u_c(Bilan_{Att,i}) = \left[u^2(\dot{Q}_{pertes,i}) + 2 \frac{(MC_p)_{briques}^2}{(\Delta t)^2} \cdot u^2(\bar{T}_{briques,i}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-8})$$

$$u_c(Bilan_{Ch,i}) = [u_c^2(Bilan_{Att,i}) + u^2(P_{Ch,i})]^{1/2} \quad (\text{A VII-9})$$

$$u_c(Bilan_{Déch,i}) = [u_c^2(Bilan_{Att,i}) + u^2(\dot{Q}_{Déch,i})]^{1/2} \quad (\text{A VII-10})$$

$$u_c(Bilan_{hiver}) = \left[u^2(E_{Ch,hiver}) + u^2(Q_{D\acute{e}ch,hiver}) + u^2(Q_{pertes,hiver}) + 2 \frac{(MC_p)_{briques}^2}{3 \cdot 600^2} \cdot u^2(\bar{T}_{briques,i}) \right]^{1/2} \quad (A VII-11)$$

Pour calculer ces incertitudes, on utilise les résultats des calculs présentés aux points 1 à 6 de cette annexe. Le Tableau-A VII-4 présente les valeurs nominales et les incertitudes considérées sur les variables requises, autres que celles qui ont déjà été présentées. On ne considère pas d'incertitude sur la masse thermique équivalente des briques $(MC_p)_{briques}$ et la valeur nominale est tirée de la sous-section 1.2.2 de ce mémoire. L'incertitude sur les bilans d'énergie instantanés des ATC varie entre ± 7 et ± 8 kW. L'incertitude sur le bilan d'énergie saisonnier est de ± 400 kWh pour chacun des ATC.

Tableau-A VII-4 Valeurs nominales et incertitudes considérées sur les variables requises pour calculer le bilan d'énergie de l'ATC

Variable	ATC	Valeur nominale	Incertainde	Unités
$(MC_p)_{briques}$	1,2,3	2 153	s. o.	kJ/K
Δt	1,2,3	900	s. o.	s
$\bar{T}_{briques,i}$	1	s. o.	± 2	°C
	2	s. o.		
	3	s. o.		
$Bilan_{Att,i}$	1,2,3	s. o.	± 7	kW
$Bilan_{Ch,i}$	1,2,3	s. o.	± 7	kW
$Bilan_{D\acute{e}ch,i}$	1	s. o.	± 7	kW
	2,3	s. o.	± 8	kW
$Bilan_{hiver}$	1,2,3	s. o.	± 400	kWh

8. Rendement énergétique

Le rendement énergétique saisonnier de l'ATC pour la période d'hiver est calculé avec l'équation (4.16). En suivant une méthode de substitution analogue à celle utilisée précédemment, on obtient l'équation (A VII-12) qui permet de calculer l'incertitude sur le rendement énergétique, soit $u_c(\eta_{ATC,hiver})$. Cette équation utilise les incertitudes sur l'énergie

thermique fournie et l'énergie électrique consommée dont les calculs ont été présentés respectivement aux points 2 et 4. L'incertitude sur le rendement énergétique saisonnier est de $\pm 1\%$ pour chacun des ATC.

$$u_c(\eta_{ATC,hiver}) = \left[\frac{u^2(Q_{Déch,hiver})}{E_{Ch,hiver}^2} + \left(\frac{Q_{Déch,hiver}}{E_{Ch,hiver}} \right)^2 \cdot u^2(E_{Ch,hiver}) \right]^{1/2} \quad (\text{A VII-12})$$

ANNEXE VIII

COEFFICIENT DE DÉPERDITIONS THERMIQUES EFFECTIF

Le coefficient de déperditions thermiques effectif ($(UA)_{\text{effectif}}$) a été calculé lors des périodes d'attente pour les trois ATC du site #10. Cette annexe présente des résultats complémentaires à ceux présentés dans le Chapitre 4.

La Figure-A VIII-1 présente des extraits des régressions utilisées pour calculer le coefficient de déperditions thermiques effectif moyen de chaque ATC.

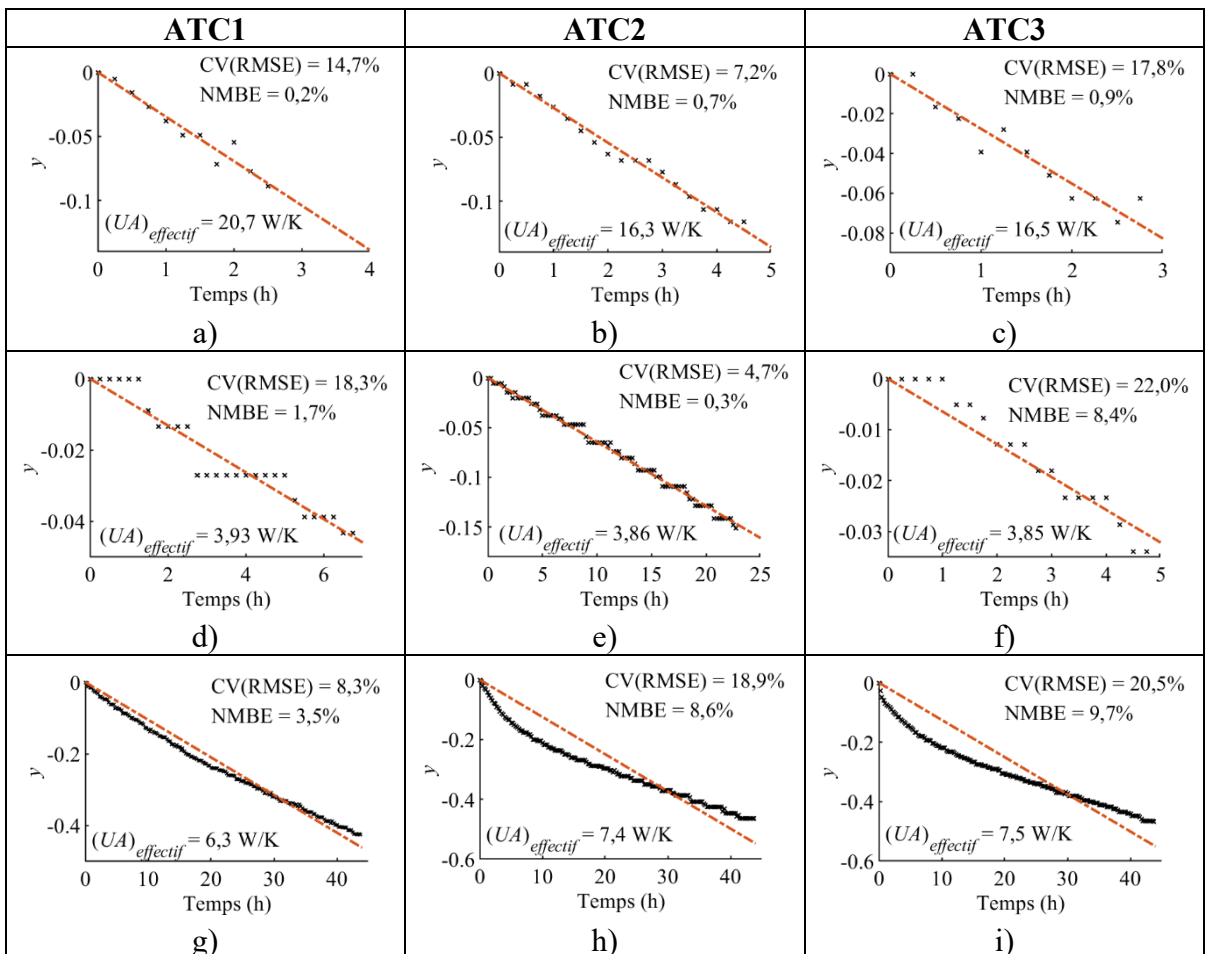


Figure-A VIII-1 Extraits des régressions linéaires utilisées pour calculer le coefficient de déperditions thermiques effectif moyen de chaque ATC

Les graphiques a) à i) présentent l'expression logarithmique de l'équation (4.10), indiquée par y , en fonction du temps en heures de la période d'attente. Les régressions linéaires correspondant aux valeurs maximales (graphiques a) à c)) et minimales (graphiques d) à f)) de coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ calculées pour chaque ATC sont montrées. Les graphiques g) à i) montrent quant à elles des régressions qui résultent en un coefficient proche de la valeur moyenne qui a été présentée dans le Tableau 4.14. On remarque que les périodes d'attente menant aux valeurs maximales de coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ (graphiques a) à c)) sont de plus courte durée que celles menant à des coefficients proches de la valeur moyenne (graphiques g) à i)). Les valeurs minimales de coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ correspondent quant à elles à des périodes pendant lesquelles la température moyenne des briques est demeurée inchangée pendant quelques instants consécutifs, tels que le montrent les plateaux sur les graphiques d) à f).

La durée des périodes d'attente détermine le nombre de points utilisés, ce qui influence nécessairement la qualité de la régression. La Figure-A VIII-1 montre que les régressions suivent assez bien les points expérimentaux, sauf pour les périodes d'attente plus longues montrées sur les graphiques h) et i) qui présentent des changements de pente. Ces périodes rencontrent les critères statistiques présentés au paragraphe 4.2.3.4. La variation logarithmique de la température moyenne des briques présentée en ordonnée de ces graphiques combine à la fois les transferts de chaleur conductifs, convectifs et radiatifs. Au fur et à mesure que la température moyenne des briques diminue, le mode de transfert de chaleur évolue, passant de fortement radiatif à de hautes températures de briques, à principalement conductif à de basses températures. Les pertes par convection évoluent aussi, étant influencées par la température des parois externes de l'ATC. Cette évolution du mode de transfert de chaleur peut expliquer les changements de pentes qui sont notables pour certaines périodes d'attente.

La Figure-A VIII-2 montre la durée des périodes d'attente en fonction du coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ calculé. Les valeurs élevées de $(UA)_{\text{effectif}}$ correspondent à de courtes périodes d'attente (<5h). Les coefficients compris entre 3,5 et 7,5 W/K, qui sont les valeurs les plus fréquentes d'après ce qu'a montré la Figure 4.17, correspondent autant à de courtes périodes qu'à de plus longues, variant entre 3 h et 44 h. Ainsi, les coefficients moyens qui ont été présentés dans le Tableau

4.14 représentent autant des courtes que des longues périodes d'attente, ce qui est souhaitable pour quantifier les pertes thermiques saisonnières. La Figure-A VIII-1 (graphiques a) à c)) et la Figure-A VIII-2 ne permettent toutefois pas de cerner des causes possibles expliquant des déperditions thermiques momentanément plus élevées (c.-à-d. un coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ élevé).

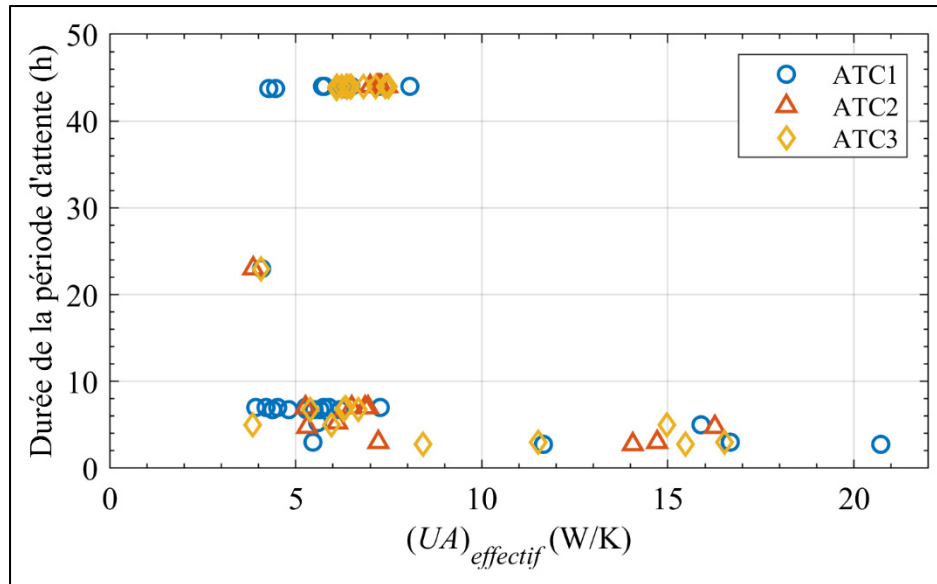


Figure-A VIII-2 Durée de la période d'attente et coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$

Pour faire les régressions, les valeurs représentées en ordonnée sur la Figure-A VIII-1 dépendent de la température ambiante de la salle mécanique qui a été considérée constante à 23°C. Cette hypothèse est basée sur la consigne de température utilisée pour contrôler le système de ventilation de la salle mécanique. Dans les faits, cette température n'est évidemment pas constante. Les indicateurs statistiques CV(RMSE) et NMBE pourraient varier si la température ambiante était ajustée pour chaque régression, ce qui n'a pas été effectué.

Le Tableau-A VIII-1 présente la date et l'heure du début des périodes d'attente qui correspondent aux valeurs les plus élevées de coefficients $(UA)_{\text{effectif}}$ de chaque ATC, celles supérieures à 8 W/K. On remarque que plusieurs de ces valeurs maximales correspondent aux mêmes moments, principalement des vendredis aux mois de mars et avril durant les heures d'occupation du bâtiment. Les périodes d'attente du 26 mars, du 2 avril et du 16 avril mènent

à des coefficients élevés et similaires pour les trois ATC. Ces résultats suggèrent que la température ambiante était potentiellement inférieure à 23°C à ces moments, ce qui a augmenté les pertes thermiques des ATC et le coefficient $(UA)_{\text{effectif}}$ calculé. Il n'a pas été possible de confirmer auprès des opérateurs du bâtiment s'il y a eu des interventions dans la salle mécanique à ces moments spécifiques (p. ex. ouverture de la porte de garage) qui auraient pu mener à des pertes thermiques plus élevées des ATC. Une intervention sur les ATC affectant leur isolation thermique (p. ex. ouverture de l'ATC en soulevant la couverture isolante) aurait aussi augmenté les déperditions thermiques.

Tableau-A VIII-1 Périodes d'attente correspondant aux $(UA)_{\text{effectif}}$ les plus élevés

Début de la période d'attente	$(UA)_{\text{effectif}}$ (W/K)		
	ATC1	ATC2	ATC3
Vendredi 19 mars 2021 20:00	8,07	s. o.	s. o.
Mercredi 24 mars 2021 13:15	20,7	s. o.	11,5
Vendredi 26 mars 2021 11:00	15,9	16,3	15,0
Vendredi 2 avril 2021 13:15	11,7	14,1	15,5
Vendredi 16 avril 2021 13:00	16,7	14,7	16,5
Vendredi 5 mai 2021 9:15	s. o.	s. o.	8,4

ANNEXE IX

SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE, CONSTATS ET ACTIONS RECOMMANDÉES

Cette annexe présente, aux pages qui suivent, le Tableau-A IX-1 qui complète la fin du Chapitre 4 (section 4.4) sur la synthèse de la performance actuelle des ATC et des constats généraux qui en sont tirés. Ce tableau reprend les caractéristiques des sites et des ATC, ainsi que les indicateurs de performance sous le même format que le Tableau 4.23 qui a été présenté. Ces données sont tirées du Rapport technique. Les indicateurs de la performance actuelle ont été publiés dans ce Rapport technique à la suite des travaux de collègues du groupe de recherche, tel que souligné à la fin du Chapitre 2 et au début du Chapitre 4.

À la différence du Tableau 4.23, le Tableau-A IX-1 inclut des **constats** sur la performance et l'opération, ainsi que des **actions recommandées**, qui sont spécifiques à chaque site et ATC. Les constats portant sur les sites #7, 10 et 14 ont été tirés de l'analyse des données d'opération réalisée par l'auteur de ce mémoire. Les actions recommandées pour ces sites sont issues de cette analyse. Pour les autres sites, les constats indiqués ont été tirés à partir des travaux des collègues du groupe de recherche qui ont traité, analysé ces données et publié leurs rapports individuels de projet. Certains de ces constats ont été inclus dans diverses sections du Rapport technique. Les références explicites à ces rapports sont indiquées dans le tableau. Ces constats et actions spécifiques recommandées pour tous les sites n'apparaissent ni dans les rapports individuels de projet des collègues, ni dans le Rapport technique, d'où la contribution originale à cet égard. Il est à noter que le Tableau-A IX-1 inclut aussi des sites pour lesquels un scénario de substitution n'a pu être considéré. Malgré cela, les données d'opération disponibles pour certains de ces sites ont permis de tirer des constats et de recommander des actions à prendre, d'où le fait qu'ils sont inclus dans le tableau. Enfin, pour quelques sites, il n'a tout simplement pas été possible d'analyser les données soit parce qu'elles présentaient des incohérences vis-à-vis des bilans d'énergie, ou parce que des données étaient manquantes pour quantifier la puissance appelée par l'ATC. Cela souligne les limites de la méthode utilisée pour quantifier la performance in situ avec des données d'opération.

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance des ATC, constats tirés de l'analyse des données et actions recommandées

Caractéristiques*				Indicateurs de la performance actuelle*				Constats sur la performance et sur l'opération; Actions recommandées
ID Site	ID ATC	Utilis. ATC	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	η (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]	
Scénario de subst. 100% électrique								
#1	1	S. princ.	Oui	-51 [-36%]	78	-2 500 [-18%]	~0 [~0%]	Écart de température importants (~10 à 30°C) entre la sonde de température de l'eau à la sortie de l'échangeur de l'ATC, celle affichée par RLoc114, et celle sur la tuyauterie en aval (Danjou, 2021). Vérifier l'état et la position de la sonde à la sortie de l'échangeur. Réviser CLoc014.
#2	1	S. princ.	Oui	-44 [-44%]	70	-1 500 [-18%]	~0 [~0%]	s. o.
#9	1	G. pte.	Non	-37 [-15%]	83	+1 900 [+4%]	~0 [~0%]	Probable qu'il y ait des éléments chauffants défectueux (5 un./18) (Makhlouf, 2022). À vérifier.
#11	1	G. pte.	Non	-19 [-5%]	58	-750 [-1%]	~0 [~0%]	-Débit d'eau mesuré de 0,44 L/s pour l'ATC2. Très faible par rapport à l'ATC1 (1,27 L/s) et au 1,70 L/s attendu, impactant la puissance fournie (Drouet, 2022). Vérifier l'état de la pompe, des filtres à tamis, des robinets et la configuration de la tuyauterie. -Charge des ATC contrôlée selon le mode <i>Intellicarge</i> , mais RLoc109 indique que les sondes T_{ext} sont absentes ou défectueuses (Drouet, 2022). Impact important sur la quantité d'énergie stockée, puis l'énergie fournie. (voir page suivante)
	2	G. pte.			66			

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance des ATC, constats tirés de l'analyse des données et actions recommandées (suite)

Caractéristiques*				Indicateurs de la performance actuelle*				Constats sur la performance et sur l'opération; Actions recommandées
ID Site	ID ATC	Utilis. ATC	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	η (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]	
Scénario de subst. 100% électrique								
#11	...	...	...	...	...	...	...	-Incohérence entre la consigne de température des briques affichée sur l'interface du BMS, calculée par le BMS selon la température extérieure, et celle calculée par le contrôleur (<i>Intellicharge</i>). S'assurer que le mode <i>Intellicharge</i> est souhaité; sinon modifier CLoc010/011.
#16**	1	G. pte.	Oui	-68 [-32%]	89	-2 200 [-11%]	~0 [~0%]	s. o.
#18	1	S. princ.	Non	-30 [-33%]	96	-1 600 [-10%]	~0 [~0%]	-Consigne de température des briques élevée (>700°C) et constante tout le mois, sans que l'énergie fournie par l'ATC le justifie (Makhlouf, 2022 ; D'Avignon, 2022). -Défaillances d'éléments chauffants confirmées sur place (5 un./12). -Faible découplage temporel et en puissance entre la charge et la décharge (Makhlouf, 2022 ; D'Avignon, 2022); opération analogue à une chaudière à éviter. Revoir les besoins thermiques à combler et la consigne de température des briques. Vérifier si un ATC de 53 kW est suffisant pour rencontrer le critère d'exemplarité de l'État.
Scénario de subst. biénergie								
#4**	1	S. princ.	Oui	-5 [-3%]	86	-1 400 [-6%]	-21,6 [-98%]	s. o.
	2	S. princ.			86			
	3	S. princ.			89			

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance des ATC, constats tirés de l'analyse des données et actions recommandées (suite)

Caractéristiques*				Indicateurs de la performance actuelle*				Constats sur la performance et sur l'opération; Actions recommandées
ID Site	ID ATC	Utilis. ATC	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	η (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]	
Scénario de subst. biénergie								
#5**	1	S. princ.	Oui	+35 [+29%]	88	-1 100 [-5%]	-36 [-95%]	Probable qu'il y ait des éléments chauffants défaillants (3 un./18) (Ngansop Ngopjop, 2021 ; D'Avignon, 2022). À vérifier.
	2	G. pte.			73			Même consigne de température des briques que l'ATC1, alors que son utilisation est différente, ce qui diminue le rendement (D'Avignon, 2022). Ajuster la consigne de l'ATC2 en conséquence.
#10	1	G. pte.	Oui	~0 [~0%]	79	+300 [~0%]	-13,6 [-47%]	Pertes thermiques induites par la charge avant une période prolongée sans décharge (~2,5 jrs). Modifier l'autorisation de charge en ne la permettant pas le vendredi PM, jusqu'au dimanche suivant.
	2	G. pte.			84			
	3	G. pte.			73			
Sans possibilité d'évaluer un scénario de subst.								
#3**	1	S. princ.	Oui	nd	86	nd	nd	-Incohérence entre les données d'opération relatives à la charge des ATC et celles d'HQ; empêchant d'évaluer un scénario de subst.
	2	S. princ.			88			-Basses vitesses (<20%) commandées au moteur du ventilateur pendant des périodes prolongées (~3 jrs) (Danjou, 2021 ; D'Avignon, 2022). Moduler la consigne de température de l'eau à la sortie de l'échangeur de l'ATC. Réviser CLoc014/CLoc028.
#6	1	S. princ.	Oui	nd	nd	nd	nd	Incohérence des données relatives à la décharge et à la charge des ATC; empêchant de les analyser.
	2	S. princ.			nd			

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance des ATC, constats tirés de l'analyse des données et actions recommandées (suite)

Caractéristiques*				Indicateurs de la performance actuelle*				Constats sur la performance et sur l'opération; Actions recommandées
ID Site	ID ATC	Utilis. ATC	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	η (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]	
Sans possibilité d'évaluer un scénario de subst.								
#7	1	S. princ.	Oui	nd	nd	nd	nd	-Incohérence des données relatives à la décharge de l'ATC; empêchant de les analyser. -Incohérence entre CLoc015/040 qui limitent la température maximale des briques à 693°C, alors que la consigne affichée sur l'interface du BMS peut aller jusqu'à 760°C. Assurer la cohérence entre la consigne affichée par le BMS et celle limitée par les canaux CLoc015/040.
#8**	1	S. princ.	nd	nd	nd	nd	nd	s. o.
#12**	1	G. pte.	Oui	nd	~0	nd	nd	Défaillance du ventilateur empêchant la décharge durant tout l'hiver, mais l'ATC a quand même été chargé (~6 700 kWh) (Charbonneau, 2022 ; D'Avignon, 2022). Vérifier l'état du moteur.
#13**	1	G. pte.	Oui	nd	nd	nd	nd	s. o.
#14**	1	G. pte.	Oui	nd	nd	nd	nd	-Variations temporelles trop élevées de modulation (MOD) de l'ATC pour évaluer sa puissance appelée. -Par l'analyse préliminaire, vérifier le mesurage de la puissance appelée de la chaufferie , puisqu'il présente des écarts importants par rapport aux données d'HQ.
	2	G. pte.						Données manquantes quant à la charge de l'ATC. Vérifier si un panneau de relais SSR est installé sur l'ATC2, et le cas échéant, l'activer via CLoc053. Ce panneau est présent et activé sur l'ATC1, qui a été installé au même moment que l'ATC2.

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance des ATC, constats tirés de l'analyse des données et actions recommandées (suite)

Caractéristiques*				Indicateurs de la performance actuelle*				Constats sur la performance et sur l'opération; Actions recommandées
ID Site	ID ATC	Utilis. ATC	Ex. État	$\Delta P_{max,hiver}$ (kW) [% $P_{max,subst}$]	η (%)	$\Delta Coûts_{hiver}$ (\$) [% $Coûts_{subst}$]	$\Delta E_{GES,hiver}$ (tCO ₂ éq) [% $E_{GES,subst}$]	
Sans possibilité d'évaluer un scénario de subst.								
#15**	1	G. pte.	Oui	nd	nd	nd	nd	s. o.
#17**	1	G. pte.	Non	nd	nd	nd	nd	Données manquantes quant à la charge de l'ATC.
<p>*Caractéristiques des sites, des ATC et indicateurs de performance tirés de D'Avignon (2022, p. 52, 63-64). **Ces sites ont plus d'un compteur d'électricité. Ceux-ci ont été combinés, tant dans le scénario avec ATC que de substitution. Le tarif d'électricité considéré a été établi en fonction de l'appel max. total de puissance de l'hiver. Cette méthode a donc un impact sur les résultats indiqués pour $\Delta P_{max,hiver}$ et $\Delta Coûts_{hiver}$.</p> <p>Description des en-têtes de colonnes : Utilis. ATC : Utilisation de l'ATC; S. princ. : Source principale; G. pte. : Gestion de pointe Ex. État : Respect du critère d'exemplarité de l'État dans le scénario avec ATC (c.-à-d. CTA de combustible < 15% de CTA d'énergie) $\Delta P_{max,hiver}$: Impact de l'ATC sur la puissance max. appelée du site pendant la période d'hiver $P_{max,subst}$: Puissance max. appelée du site pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution η : Rendement énergétique de l'ATC ($=\eta_{ATC,hiver}$) $\Delta Coûts_{hiver}$: Impact de l'ATC sur les coûts énergétiques pendant la période d'hiver $Coûts_{subst}$: Coûts énergétiques pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution $\Delta E_{GES,hiver}$: Impact de l'ATC sur les émissions de GES du site pendant la période d'hiver $E_{GES,subst}$: Émissions de GES du site pendant la période d'hiver selon le scénario de substitution</p>								

ANNEXE X

GABARIT DE BILAN D'ÉNERGIE DE L'ATC HYDRONIQUE

Cette annexe présente, aux pages qui suivent, le Tableau-A X-1 qui est un gabarit de bilan d'énergie heure par heure de l'ATC hydronique (modèle de 80 kW). Ce gabarit a été élaboré à partir des caractéristiques de l'ATC présentées dans la sous-section 1.2.2, ainsi que des résultats tirés du Chapitre 4 et du Chapitre 5. Tel que mentionné au Chapitre 5, ce gabarit est proposé comme un outil à utiliser lors de la conception afin de : 1) valider que l'ATC hydronique peut satisfaire les besoins thermiques à combler lors d'une journée critique et 2) quantifier le potentiel de déplacement ou de nivelage de la demande.

La partie du haut du Tableau-A X-1 détaille les paramètres considérés constants. Les valeurs dans les cases jaunes doivent être modifiées pour chaque utilisation de ce gabarit. Les valeurs dans ces cases sont basées sur les résultats tirés du Chapitre 4 et ne sont qu'à titre indicatif.

La partie du bas du Tableau-A X-1 est le bilan d'énergie heure par heure de l'ATC. Les équations simplifiées à utiliser sont indiquées dans chaque case : les colonnes sont dénommées par les lettres **A** à **N** et les lignes par l'indice *i*. Au besoin, d'autres colonnes peuvent être ajoutées au gabarit par exemple pour indiquer la consigne de température des briques à atteindre. Ce bilan est horaire, suivant le gabarit proposé par l'AHRI (2017) pour d'autres systèmes de stockage thermique que l'ATC hydronique. Il est toutefois suggéré de réduire à moins d'une heure l'intervalle de temps entre les lignes, si la résolution temporelle des profils de besoins thermiques à combler et de puissance électrique disponible le permet. Les valeurs dans les colonnes ayant des cases jaunes qui indiquent « =*Input* » doivent être définies pour chaque utilisation visée de l'ATC hydronique. Enfin, l'équation indiquée dans la colonne **N** est la régression établie au Chapitre 5 à partir d'ATC opérés avec des débits d'eau moyens **variant entre 1,39 et 1,84 L/s** et des températures de l'eau à l'entrée des échangeurs de chaleur pour la **plupart inférieures à 70°C**. La méthode employée pour établir cette équation et les limites de celle-ci ont respectivement été discutées dans les sections 5.1 et 5.2 de ce mémoire.

Tableau-A X-1 Gabarit de bilan d'énergie heure par heure de l'ATC hydronique de 80 kW avec des équations simplifiées
Basé sur le gabarit proposé de l'AHRI (2017, app. E)

ATC hydronique 80 kW _e (440 kWh)			Fluide caloporteur : Eau de chauffage (sans glycol)			
Coefficient de déperditions thermiques effectif	$(UA)_{\text{effectif}}$	6,8·10 ⁻³ kW/K	Débit volumique	\dot{V}	1,8 L/s	
Briques			Capacité thermique	C_p	4,19 kJ/kg·K	
Masse**	M	2 341 kg	Densité	ρ	0,98 kg/L	
Capacité thermique**	C_p	0,92 kJ/kg·K	Salle mécanique			
Température initiale moyenne	$\bar{T}_{\text{briques},t=0}$	100°C	Température	T_{amb}	23°C	
Colonnes*	A	B	C	D	E	F
Heure (i)	Décharge					
	Besoin thermique à combler	$AutDéch$ (binaire)	$\dot{Q}_{Déch,max}$	$\dot{Q}_{Déch}$	ΔT_{eau} (°C)	Besoin non comblé
0 – 1 (1)	=Input	=Input	= $N_i \cdot (\rho \dot{V} C_p)_{\text{eau}}$	= $B_i \cdot \min(A_i; C_i)$	= $D_i / (\rho \dot{V} C_p)_{\text{eau}}$	= $A_i - D_i$
1 – 2 (2)	=Input	=Input	(Idem)	(Idem)	(Idem)	(Idem)
2 – 3 (3)	=Input	=Input	(Idem)	(Idem)	(Idem)	(Idem)
3 – 4 (4)	...	...	...	...	...	...
4 – 5 (5)						
...
19 – 20 (20)						
20 – 21 (21)						
21 – 22 (22)						
22 – 23 (23)						
23 – 0 (24)						
Total (kWh)	= $\sum_{i=1}^{24} A_i$	s. o.	s. o.	= $\sum_{i=1}^{24} D_i$	s. o.	= $\sum_{i=1}^{24} F_i$

Les valeurs dans les cellules jaunes doivent être définies pour chaque utilisation spécifique de l'ATC. Les en-têtes de colonnes sont décrits à la page suivante.
*Sauf si indication contraire, les unités utilisées dans les colonnes sont le kW (électrique ou thermique, selon ce qui s'applique).
**Tel que spécifié dans les références indiquées dans la sous-section 1.2.2 de la revue de la littérature.

Tableau-A X-1 Gabarit de bilan d'énergie heure par heure de l'ATC hydronique de 80 kW avec des équations simplifiées (suite)

Colonnes*	G	H	I	J	K	L	M	N
Heure (i)	Charge				Énergie stockée			
	$P_{elec,bât}$ (sans ATC)	Puissance disponible	$AutCh$ (binaire)	P_{ch}	$\bar{T}_{briques}$ (°C)	\dot{Q}_{pertes}	ΔQ_{stock} (kWh)	$\Delta T_{eau,max}$ (°C)
0 – 1 (1)	=Input	= $P_{déstage,bât} - G_i$	=Input	=Input	= $\bar{T}_{briques,t=0}$	= $(UA)_{effectif} \cdot (K_i - T_{amb})$	= $(J_i - D_i - L_i) \cdot 1$ [h]	= $-1,1725 + 0,0246 \cdot K_i - 1,010 \cdot 10^{-5} \cdot (K_i)^2$
1 – 2 (2)	=Input	(Idem)	=Input	=Input	= $M_{i-1} \cdot 3600$ [kJ/kWh] / $(MC_p)_{briques} + K_{i-1}$	(Idem)	(Idem)	(Idem)
2 – 3 (3)	=Input	(Idem)	=Input	=Input	(Idem)	(Idem)	(Idem)	(Idem)
3 – 4 (4)	...	...	...	...	...	...	...	...
4 – 5 (5)								
...
19 – 20 (20)								
20 – 21 (21)								
21 – 22 (22)								
22 – 23 (23)								
23 – 0 (24)								
Total (kWh)	s. o.	s. o.	s. o.	= $\sum_{i=1}^{24} J_i$	s. o.	= $\sum_{i=1}^{24} L_i$	s. o.	s. o.

Les valeurs dans les cellules jaunes doivent être définies pour chaque utilisation spécifique de l'ATC.

*Sauf si indication contraire, les unités utilisées dans les colonnes sont le kW (électrique ou thermique, selon ce qui s'applique).

Description des en-têtes de colonnes :

$AutDéch$: Autorisation de décharge

$\dot{Q}_{Déch,max}$: Puissance thermique maximale pouvant être fournie par l'ATC (modèle de 80 kW_e; 440 kWh)

$\dot{Q}_{Déch}$: Puissance thermique fournie

ΔT_{eau} : Différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur de chaleur de l'ATC

$P_{elec,bât}$: Puissance appelée sur le compteur d'électricité du bâtiment, sans la puissance appelée de l'ATC

$P_{déstage,bât}$: Puissance de déstage du bâtiment

$AutCh$: Autorisation de charge

P_{ch} : Puissance électrique appelée par les éléments chauffants pour la charge de l'ATC (max. 80 kW_e)

$\bar{T}_{briques}$: Température moyenne des briques

\dot{Q}_{pertes} : Pertes thermiques au-travers des parois externes de l'ATC

ΔQ_{stock} : Variation d'énergie thermique stockée

$\Delta T_{eau,max}$: Différence maximale de température de l'eau entre la sortie et l'entrée de l'échangeur

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHRI. (2017). *Guideline for Specifying the Performance of Cool Thermal Storage Equipment* (Rapport No. Guideline T (SI)-2017). Arlington, VA : AHRI.
- American Society of Mechanical Engineers. (2011). *Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits Using Transit-Time Ultrasonic Flowmeters*. Norme ASME MFC-5.1-2011. New York, NY : ASME.
- Antonucci, D., Noris, F., Oberegger, U. F., & Gasparella, A. (2015). Estimation of the water flow rate and energy consumption of a central heating system in an office building using system identification (p. 8). Communication présentée au BSA 2015 2nd IBPSA Conference, Italy.
- Arteconi, A., Hewitt, N. J., & Polonara, F. (2012). State of the art of thermal storage for demand-side management. *Applied Energy*, 93, 371-389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.045>
- ASHRAE. (1990). *Method of Testing Active Sensible Thermal Energy Storage Devices Based on Thermal Performance*. Norme ANSI/ASHRAE 94.3-1986 (RA 90). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2010). *Method of Testing Thermal Storage Devices with Electrical Input and Thermal Output Based on Thermal Performance*. Norme ANSI/ASHRAE 94.2-2010. Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2014). *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings* (Rapport No. Guideline 14-2014). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2015). 57.7.1.2 Electronic Fan Speed Control (PSC Motors). Dans *2015 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (SI Edition, p. 57.15). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2017). 19.7 Model Calibration. Dans *2017 ASHRAE Handbook - Fundamentals* (SI Edition, p. 19.34-19.37). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2019). *Method of Testing the Performance of Cool-Storage Systems*. Norme ANSI/ASHRAE 150-2019. Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2020a). 13. Hydronic Heating and Cooling. Dans *2020 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment* (SI Edition, p. 13.1-13.26). Atlanta, GA : ASHRAE.

- ASHRAE. (2020b). 36. Hydronic Heat-Distributing Units and Radiators. Dans *2020 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment* (SI Edition, p. 36.1-36.6). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2020c). 44.9 Affinity Laws. Dans *2020 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment* (SI Edition, p. 44.8-44.10). Atlanta, GA : ASHRAE.
- ASHRAE. (2020d). 50. Thermal Storage. Dans *2020 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment* (SI Edition, p. 13.1-13.26). Atlanta, GA : ASHRAE.
- Badger Meter, Inc. (2015). Hybrid Ultrasonic Flow Meters, DXN Portable Ultrasonic Measurement System: Quick Start Guide. HYB-QS-01008-EN-01. Repéré à <https://www.badgermeter.com/fr-ca/products/compteurs/debitmetres-a-ultrasons/debitmetre-hybride-a-ultrasons-portable-dynasonics-dxn/>
- Bălănescu, D. T., Homutescu, V. M., Ianuş, G., & Lupu, A. G. (2020). Study on the in situ performance of a 60 kW condensing gas boilers thermal installation and economic assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 997, 012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012140>
- Belzile, P. (2012). *Diminution de la puissance maximale appelée d'un bâtiment institutionnel* (Mémoire). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- Belzile, P., Kajl, S., Rousse, D., & Dutil, Y. (2012). Electrical thermal storage optimization for demand side management. Communication présentée au Innostock 2012 The 12th International Conference on Energy Storage.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewit, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th edition). New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
- Cattermole, D. E., & Davis, R. M. (1975). A triac voltage (speed) control for improved performance of split-phase fan motors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94(3), 786-791. <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1975.31907>
- Charbonneau, J. (2022). *Analyse de l'impact d'un accumulateur thermique électrique sur le réseau de chauffage d'un bâtiment institutionnel québécois* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- Creswell, J. W. (2007). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (2e éd.). California : Sage Publications, Inc.
- Danjou, S. (2021). *Contribution des accumulateurs thermiques électriques à la transition énergétique des réseaux de chauffage hydronique de bâtiments institutionnels québécois* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).

- Date, J., Candanedo, J. A., Athienitis, A. K., & Lavigne, K. (2020). Development of reduced order thermal dynamic models for building load flexibility of an electrically-heated high temperature thermal storage device. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(7), 956-974. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1735260>
- D'Avignon, K. (2022). *Stockage thermique et Exemplarité de l'État: Résultats de l'étude, constats et recommandations*. École de technologie supérieure. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/publications/ETS-Stockage-thermique-exemplarite-Etat.pdf>
- Desbiens, P.-M., & Groupe Master. (2016, avril). L'accumulateur thermique. Communication présentée au Colloque Multi Énergies, Québec (Qc), Université Laval.
- Dinçer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Thermal energy storage systems and applications* (Third Edition). New Jersey : John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119713173.ch1>
- Drouet, J. (2022). *Analyse comparative énergétique d'un bâtiment institutionnel suite à l'installation d'un accumulateur thermique électrique* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- Efficiency Valuation Organization. (2023). International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP). Repéré à <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp>
- Elleson, J. S., Haberl, J., & Reddy, A. (2002). Field Monitoring and Data Validation for Evaluating the Performance of Cool Storage Systems. Dans *Symposium Papers* (p. 13). Atlantic City (New Jersey) : ASHRAE.
- Endress + Hauser. (s.d.). Proline Prosonic Flow 91 HART Ultrasonic Flow Measuring System: Operating Instructions. BA00100D/06/EN/13.11.
- Énergir. (2021, 5 novembre). Prix de fourniture du gaz naturel. Repéré à <https://www.energir.com/fr/affaires/prix-de-fourniture-du-gaz-naturel/>
- Environnement et changement climatique Canada. (2022). *Rapport d'inventaire national 1990-2020: Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* (Rapport No. Partie 3). Gatineau (Qc) : Gouvernement du Canada. Repéré à Canada.ca/inventaire-ges
- Glazer, J. (2019). *ASHRAE Design Guide for Cool Thermal Storage* (2e éd.). Atlanta, GA : ASHRAE.

- Gouvernement du Québec. (2020). Plan pour une économie verte 2030: Politique-cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. Repéré à <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-economie-verte-2030.pdf?1605540555>
- Hydro-Québec. (2010). ThermÉlect Hydronique: Système électrique de chauffage central avec accumulation de chaleur, (2010G080-29F), 2.
- 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>
- Hydro-Québec Distribution. (2019). *Plan d'approvisionnement 2020-2029* (Rapport No. R-4110-2019). Hydro-Québec.
- Ido, E. I. (2020). *Inventaire et analyse du stockage thermique dans le parc immobilier institutionnel québécois* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- IRENA. (2022). *Renewable solutions in end-uses: Heat pump costs and markets*. Abu Dhabi : IRENA. Repéré à <https://www.irena.org/Publications/2022/Nov/Renewable-solutions-in-end-uses-Heat-pump-costs-and-markets>
- JCGM/WG 1. (2008). Évaluation des données de mesure: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. JCGM/WG 1.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications* (1^{re} éd.). (S.I.): Academic Press.
- Lambert, M. (2021). *Étude des facteurs d'intérêt pour les améliorations écoénergétiques majeures dans le parc immobilier institutionnel: emphase sur le volet d'approvisionnement* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- Lavigne, K. (2006). *Étude de médiums de stockage pour un appareil de stockage thermique hybride* (Mémoire). Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec).
- Leedy, P. D., Ormrod, J. E., & Johnson, L. R. (2019). *Practical research: planning and design* (12e éd.). New York : Pearson Education, Inc.
- Luo, X., Hong, T., Chen, Y., & Piette, M. A. (2017). Electric load shape benchmarking for small- and medium-sized commercial buildings. *Applied Energy*, 204, 715-725. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.108>

- Makhlouf, A. (2022). *Analyse de l'effet des accumulateurs thermiques électriques sur la pointe de puissance appelée de bâtiments scolaires* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- 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.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2020, 1 décembre). Facteurs de conversion et d'émissions utilisés pour le bilan du secteur institutionnel. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/en/affaires/secteurs/secteur-institutionnel/collecte-de-donnees>
- Moffet, M. A., Sirois, F., Joos, G., & Moreau, A. (2012). Central Electric Thermal Storage (ETS) Heating Systems: Impact on Customer and Distribution System. *IEEE*, 7.
- Moreau, A. (2015). *Intégration du stockage thermique dans les réseaux autonomes : modélisation d'un appareil de chauffage central avec accumulation thermique*.
- Moreau, A., & Dion, A. (2010). Un nouvel appareil de chauffage avec accumulation de chaleur pour les secteurs commercial et institutionnel. Communication présentée au CIFEM2010, Saly, Sénégal.
- Moreau, A., & Lemay, J. (2007, avril). La gestion de la demande avec les accumulateurs thermiques. Communication présentée au AGPI.
- Moreau, A., & Steffes, T. (2009). Managing the Heating Demand in Institutional Buildings with an Innovative Thermal Storage System. Communication présentée au Effstock 2009, Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability: 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Sweden.
- Morovat, N., Athienitis, A. K., Candanedo, J. A., & Delcroix, B. (2022). Model-Based Control Strategies to Enhance Energy Flexibility in Electrically Heated School Buildings. *Buildings* 2022, 12(581), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings12050581>
- Motegi, N., Piette, M. A., Watson, D. S., Kiliccote, S., & Xu, P. (2007). *Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response* (Rapport No. LBNL-59975). California : Lawrence Berkeley National Laboratory.
- National Institutes of Health. (2016, novembre). ECM Motors: An Energy Saving Opportunity. *Technical News Bulletin*, (58), 1.

- Ngansop Ngopjop, E. P. (2021). *Évaluation du rôle des accumulateurs thermiques électriques à briques dans l'électrification des réseaux de chauffage hydronique de bâtiments scolaires au Québec* (Rapport de projet). École de technologie supérieure, Montréal (Québec).
- Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada. (2019). Base de données complète sur la consommation d'énergie: Secteur commercial et institutionnel-Québec. Repéré à https://oe.e.ncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm
- Price, P. N. (2010). *Methods for Analyzing Electric Load Shape and its Variability* (Rapport No. LBNL-3713E, 985909). United States : California Energy Commission. <https://doi.org/10.2172/985909>
- Reddy, A., Ellesen, J., & Haberl, J. (2001). *Determining Long-term Performance of Cool Storage Systems from Short-term Tests* (Rapport No. RP-1004). ASHRAE.
- Sallam, A. A., & Malik, O. P. (2011). Demand-Side Management and Energy Efficiency. Dans *Electric Distribution Systems* (pp. 433-468). New Jersey : IEEE; John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470943854.ch12>
- Song, L., Joo, I., & Wang, G. (2012). Uncertainty analysis of a virtual water flow measurement in building energy consumption monitoring. *HVAC&R Research*, 18(5), 997-1010. <https://doi.org/10.1080/10789669.2012.658137>
- Steffes. (2016, 6 février). Heating Element Service and Repair Guide for 8100 & 9100 Series ThermElect. Document #1200453 Rev 3.
- Steffes. (2022). Electric Thermal Storage Marketing Resources. *Steffes*. Repéré à <https://www.steffes.com/ets/marketing-resources/>
- Steffes. (s.d.a). SSR Controller for Off-Peak Energy and Power Regulation. Repéré à <https://www.steffes.com/ets/downloads>
- Steffes. (s.d.b). Technical Data Sheet 9100 ThermElect Hydronic Models 9150 and 9180. Rev 3. Repéré à <https://www.steffes.com/ets/downloads/>
- Steffes. (s.d.c). ThermElect Hydronic Owner's and Installer's Manual Models: 9150, 9180 Applicable to Software Version 2.XX. Document #1200067 Rev 5. Repéré à <https://www.steffes.com/ets/downloads/>
- Steffes. (s.d.d). ThermElect Hydronic Owner's and Installer's Manual Models: 9150, 9180 With Integrated SSR Control Applicable to Software Version 2.18 - 2.XX. Document #1200067 Rev 10. Repéré à <https://www.steffes.com/ets/downloads/>

- Steffes. (s.d.-e). ThermElect Hydronique : Système de chauffage hydronique pour les secteurs commercial, institutionnel & industriel.
- Steffes Corporation. (s.d.a). Master Supplemental Installer's Guide for Comfort Plus Commercial and ThermElect: Microprocessor Function Location Descriptions and Values for Setup and Editing. V6.
- Steffes Corporation. (s.d.b). Technical Bulletin: Maximizing Element Life in ThermElect Heating Systems 8100 and 9100 Series.
- Steffes Corporation. (s.d.c). Technical Data Sheet ThermElect Hydronic Electric Thermal Storage Heating System Models 9150, 9180. Rev 2.
- Trevisan, S., Wang, W., Guedez, R., & Laumert, B. (2022). Experimental evaluation of a high-temperature radial-flow packed bed thermal energy storage under dynamic mass flow rate. *Journal of Energy Storage*, 54, 105236. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105236>
- US Department of Energy Federal Energy Management Program. (2015, novembre). M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0. Repéré à https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/mv_guide_4_0.pdf
- Ville de Québec. (2019, 10 décembre). Les boucles énergétiques [Atelier de travail du Réseau Énergie et bâtiments]. Montréal (Québec).
- Weishaupt, D., & Müller, K. (2021). Reliability of Thermal Energy Storage Technologies. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(4), 580-584. <https://doi.org/10.1002/cite.202000133>
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2022). *État de l'énergie au Québec 2022*. Montréal (Québec) : HEC Montréal, Chaire de gestion du secteur de l'énergie. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2022/03/EEQ2022_web.pdf
- Wong, S., Gaudet, G., & Proulx, L.-P. (2017). Capturing Wind With Thermal Energy Storage—Summerside's Smart Grid Approach. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 4(4), 115-124. <https://doi.org/10.1109/JPETS.2017.2754139>