



Synthèse de l'étude « Stockage thermique et Exemplarité de l'État »

Constats et recommandations aux
professionnels : conception, contrôle, opération



Auteurs : Prof. K. D'Avignon, Ing. Ph.D.
et V. Chabot, CPI



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
Université du Québec

1. Contexte, objectifs de l'étude et méthodologie
2. Parc immobilier scolaire et stockage thermique
3. De la conception à l'opération : conditions de succès
4. Performance des ATC et scénarios de substitution
5. Maintenance
6. Conclusion et bonnes pratiques à retenir

Mandat de Transition énergétique Québec (TEQ)

Maintenant : Secteur de l'innovation et de la transition énergétiques (SITE) du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN)

Équipe d'Exemplarité de l'État :

- Objectifs de réduction (GJ/m², GES) parc institutionnel
- Accompagnement : identification, planification et réalisation

↗ Énergie renouvelable

Nouvelles constructions et bâtiments existants

CTA : Consommation totale annuelle d'énergie*
(GJ ou kWh)

*excluant procédés

Vocation	CTA _{combustible} / CTA _{bâtiment}
Bureau	≤ 15 %
École prim./sec.	
Cégep	
CHSLD	
Autre	≤ 20 %
Université	
Centre hospitalier	

Objectifs de l'étude

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

1. Informer les acteurs du secteur institutionnel sur le stockage thermique
2. Faciliter le recours aux accumulateurs thermiques électriques : mise en œuvre, impact énergétique, rentabilité
3. Promouvoir les conditions gagnantes, bonnes pratiques, recommandations en vue de travaux futurs

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

1. Inventaire du stockage thermique :

Dresser l'état des lieux

2. Entrevues avec gestionnaires, opérateurs et concepteurs :

Pratiques et processus actuels, **bonnes pratiques** et recommandations pour le futur

3. Étude de performance :

Performance actuelle, **effets** des pratiques actuelles sur la performance

4. Scénarios de comparaison vs d'autres technologies :

Avantages et inconvénients → Prise de décision éclairée

Économies \$

Réduction des GES

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

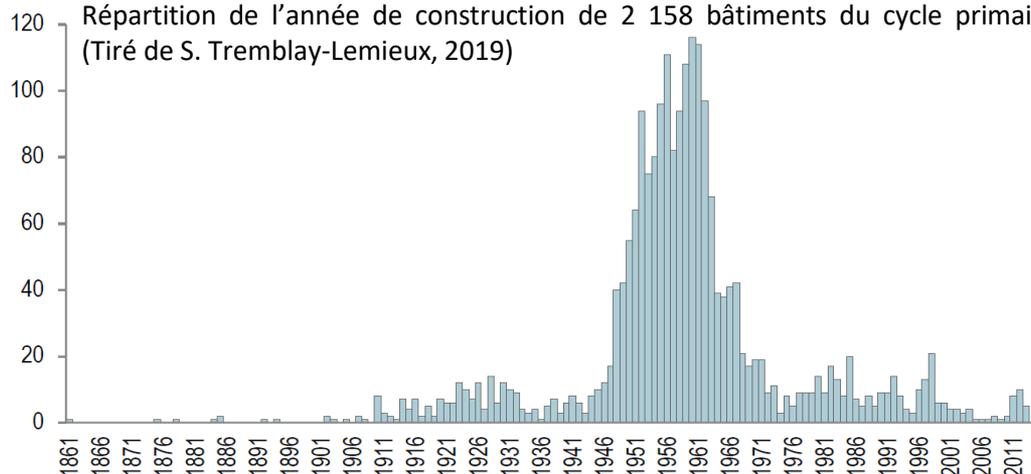
Dominance 1945 - 70

Normes de construction : 1976

Avant 1976 :

- Enveloppe faible
- Réseaux hydroniques
- Combustibles fossiles
- Ventilés naturellement

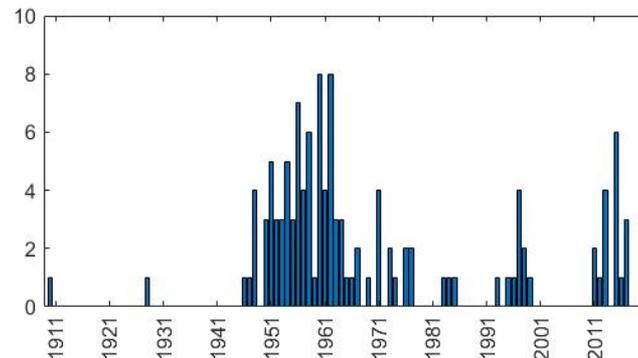
Répartition de l'année de construction de 2 158 bâtiments du cycle primaire.
(Tiré de S. Tremblay-Lemieux, 2019)



Bâtiments répertoriés :

Dominance 1945 - 70, mais ...

- Enveloppe partiellement rénovée
- Réseaux hydroniques
- Ventilés naturellement (46/121)



Adapté de la figure 8 : Répartition de l'année de construction des bâtiments d'intérêt (n=121).

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques



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

4 catégories d'intérêt

Stockage est...

A : Présent et fonctionnel

B : Évalué, mais pas retenu

C : À venir

D : Retiré

Résultat :

156 bâtiments dans 10 centres de services scolaires (CSS)

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

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

*Total >156 : Bâtiments avec plusieurs technologies

Principales motivations :

- Remplacer équipements désuets/réfection de chaufferie
- Réaliser transformation majeure
- Nouvelle construction

... en profiter pour réduire :

- Frais d'exploitation
- GES liés au chauffage
- Contrôle à distance équipement CVCA

ID.	Employeur	Nb. bâtiments	Année 1 ^{er} projet
1	Firme génie- conseil	1	2018
2		1	2017
3		~8-10	2015
4		~40	~2006
5		~20-30	~2011
6	ESE	6	2015
7		n.d.	n.d.
8	SQI	4	2018

Adapté du Tableau 7: Caractéristiques des participants aux entretiens – volet conception.

Source d'énergie avant/après stockage thermique

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

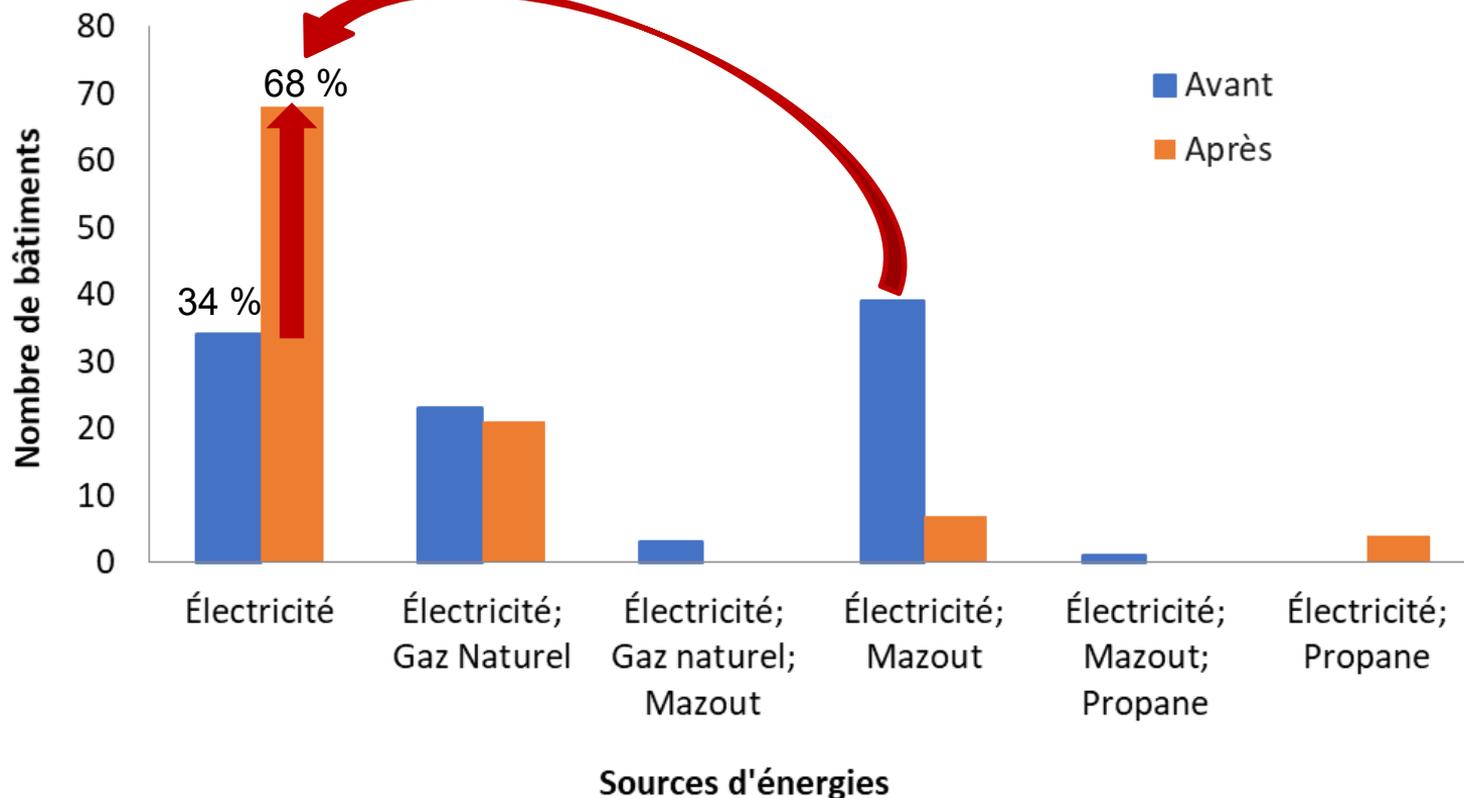


Figure 10: Répartition des sources d'énergie avant et après l'installation du stockage (n=100).

Accumulateur thermique centralisé (ATC)

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

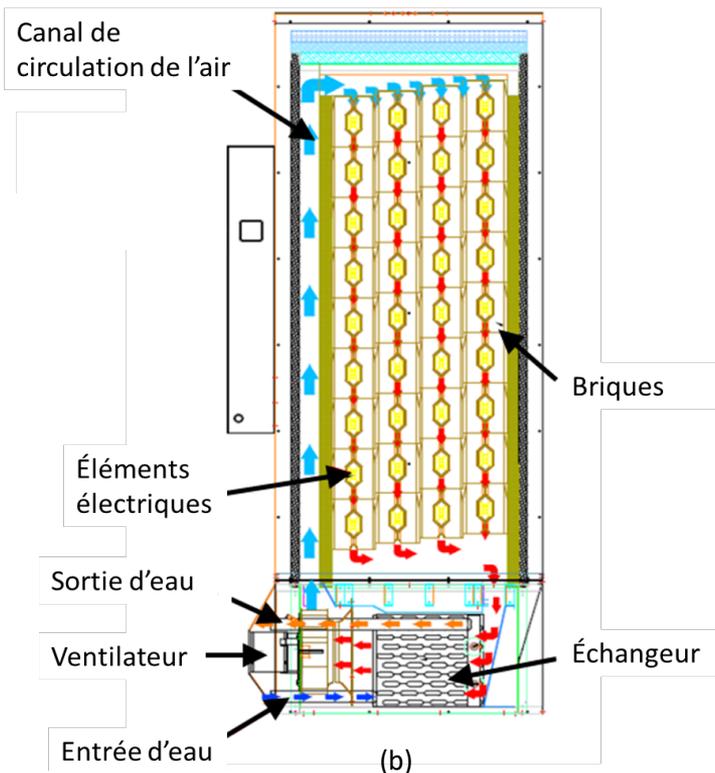
Performance

Maintenance

Bonnes pratiques



(a)



(b)

Modèle hydronique (ThermElect)

	9150	9180
Énergie max. stockée (kWh)	290	440
Puissance max. charge ($\text{kW}_{\text{élec.}}$)	53	80
Puissance max. décharge ($\text{kW}_{\text{therm.}}$)	~70	~80
Masse (kg)	2 120	2 960
Superficie au sol	~12 pi ² ; 1,1 m ²	

Steffes Corporation. (s.d.). Fiche technique : ThermElect hydronique. Révision 2.

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Décharge = Besoins thermiques à combler

- Puissance kW ET énergie kWh requises
- **À anticiper**

Énergie stockée = Température stockage

- Combien stocker kWh?

Charge = Énergie à stocker vs Décharge

- **Anticiper** puissance électrique disponible à quelle heure et combien kW ?
- Détermine **durée de charge** requise

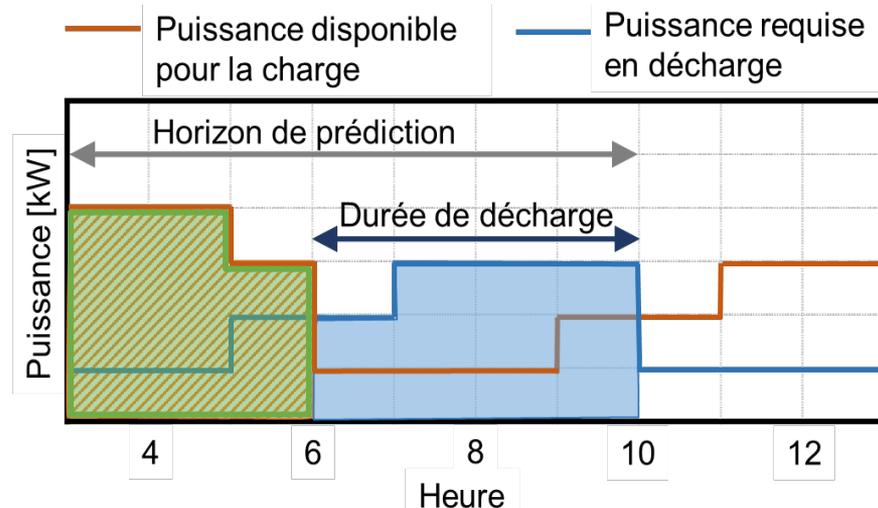
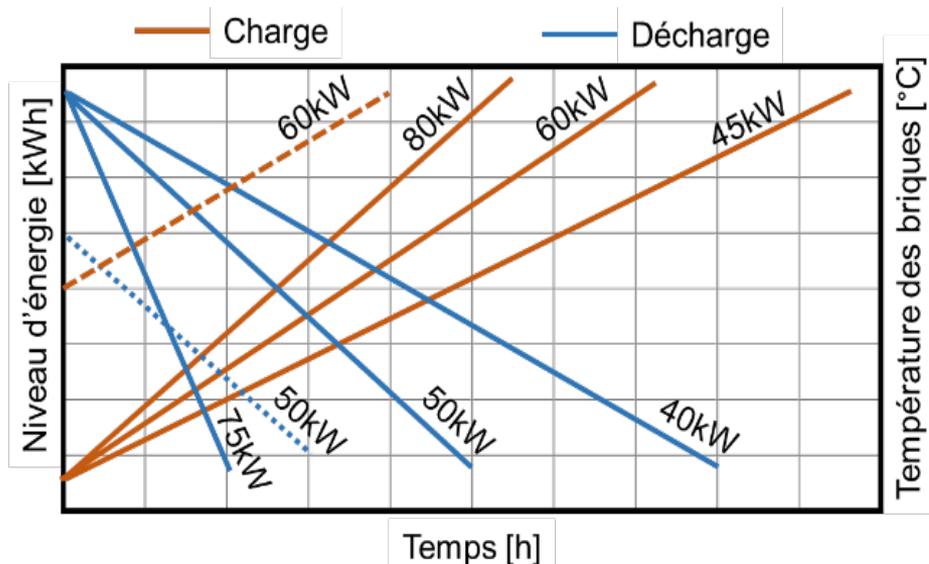


Figure 2: Exemple de commande prédictive.

Contrôle repose sur une commande prédictive

Interreliés : **Décharge** ; **Énergie stockée** ; **Charge**

Analogie : chauffe-eau domestique à réservoir



(a)

Besoins anticipés

$T^{\circ}_{stockage}$

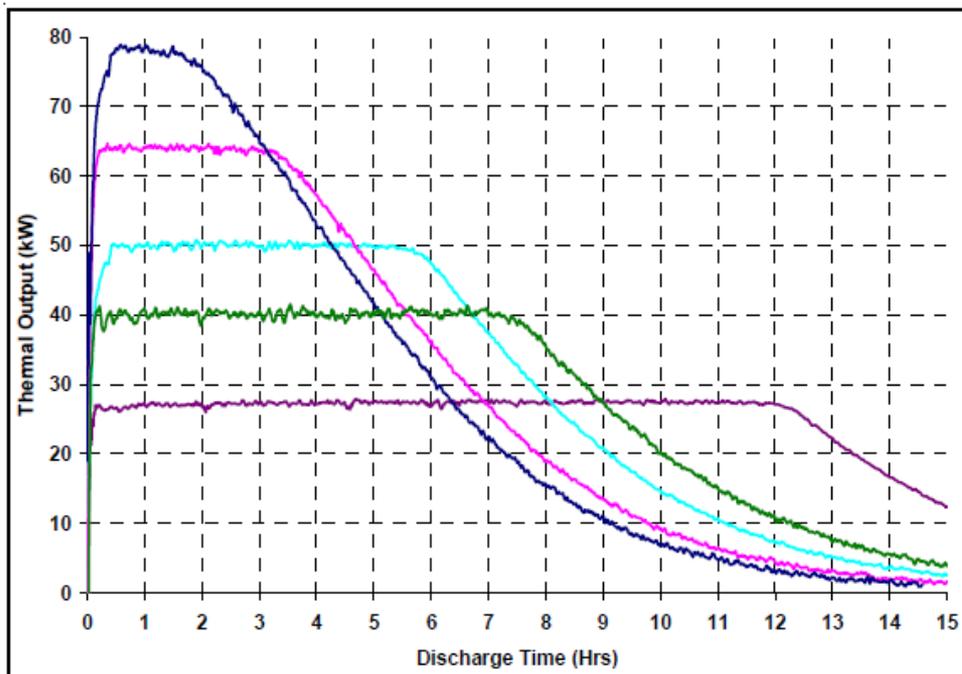
Périodes creuses de consommation électrique



(b)

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

Décharge : ↘ Énergie stockée ► ↘ Puissance max. décharge



* Courbes avec décharge seulement.
* À $t = 0$: 495 kWh ; $T^{\circ}_{briques}$ 835°C

R.#5 : Rendre disponible les courbes indiquant la **puissance** et la **durée** de décharge selon **différents** niveaux d'énergie stockée.

Énergie stockée : ↗ Température briques ► ↗ Pertes thermiques

Temp. Briques (°C)	9150		9180	
	Énergie stockée (kWh)	Pertes thermiques (kW)	Énergie stockée (kWh)	Pertes thermiques (kW)
760	290	3,0	440	4,5
600	230	2,3	350	3,5
450	170	1,7	260	2,6
300	110	1,1	170	1,7
...

Approximation de l'énergie stockée et des pertes thermiques statiques (ventilateur à l'arrêt) en fonction de la température moyenne des briques.

Charge : ↗ Énergie stockée ► ↗ Puissance électrique appelée

Augmentation de Temp. Briques ($T_{briques,f} - T_{briques,i}$) (°C)	Approx. du temps min. lorsque $P_{charge} = P_{max}$ (h)
150	1,2
300	2,4
450	3,5
600	4,6
735 (25°C à 760°C)	5,7

Approximation du temps min. requis pour augmenter la température moy. des briques lorsque la puissance de charge est constante et égale à 53 et 80 kW, respectivement pour le modèle 9150 et 9180. Considère les pertes thermiques statiques.

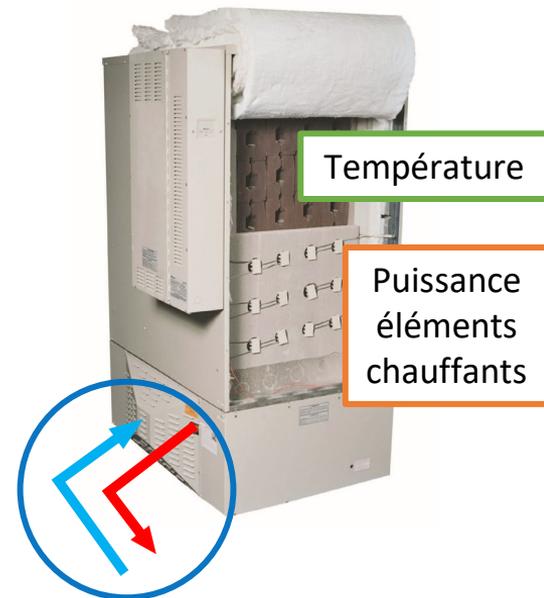
Décharge

Énergie stockée

Charge

« *Ce n'est pas tant compliqué à opérer. Côté contrôle, ce n'est pas compliqué non plus. C'est juste de savoir **comment l'optimiser.*** »

- Participant #1, entrevues O&M



- Réduire pertes thermiques
- Assurer la disponibilité du chauffage pour combler les besoins thermiques
- Gérer l'appel puissance électrique du bâtiment : profil et puissance délestage

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Réfection/élec. chaufferie **existante** :

B.P.#11 : Exploiter, *lorsque possible*, l'historique de données.

- Mieux comprendre l'opération du bâtiment
- Évaluer avec **+ de précision** besoins thermiques :
Puissance de chauffage requise et **Énergie** à accumuler
Actuellement : Factures mensuelles ► Profil $\leq 1h$
- Préciser séquence de contrôle **dès la conception**
- ↘ efforts et durée rodage fait par les opérateurs durant 1^{ère} année

Prédiction de température extérieure

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

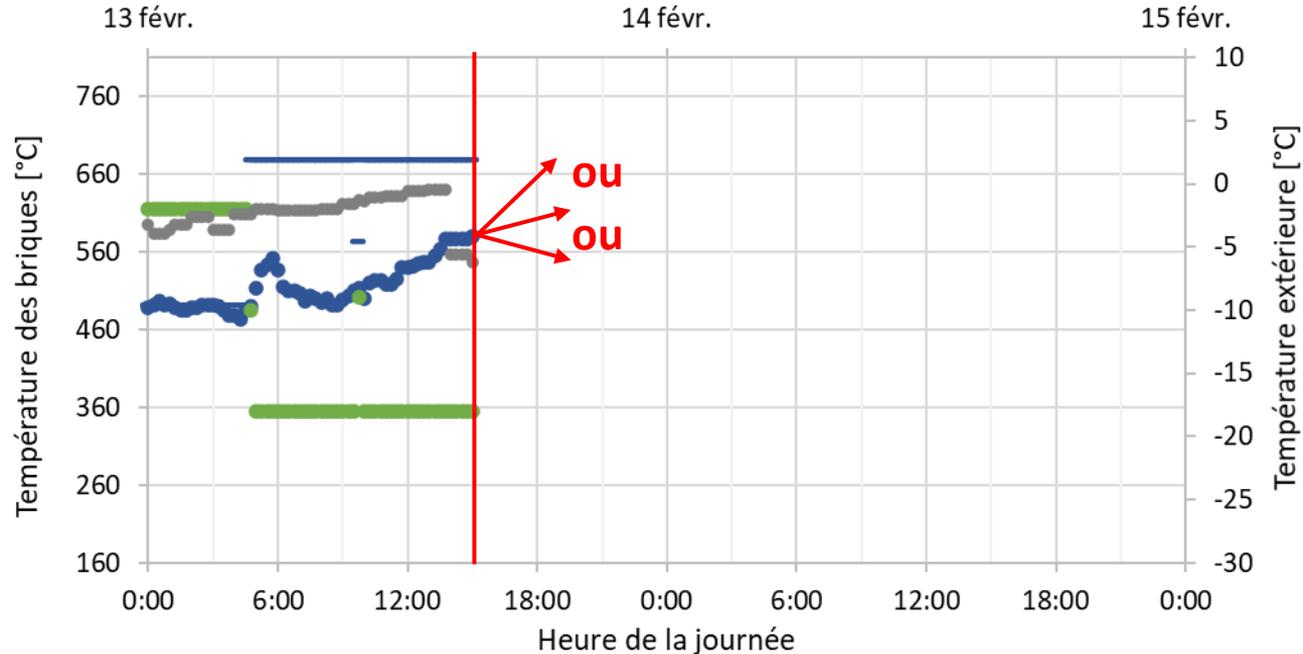
Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Fin de journée (15:00) : Charger en prévision des besoins du lendemain

● Tbriques - Consigne Tbriques (avec prédiction) ● Text (prédiction) ● Text



Prédiction de température extérieure

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

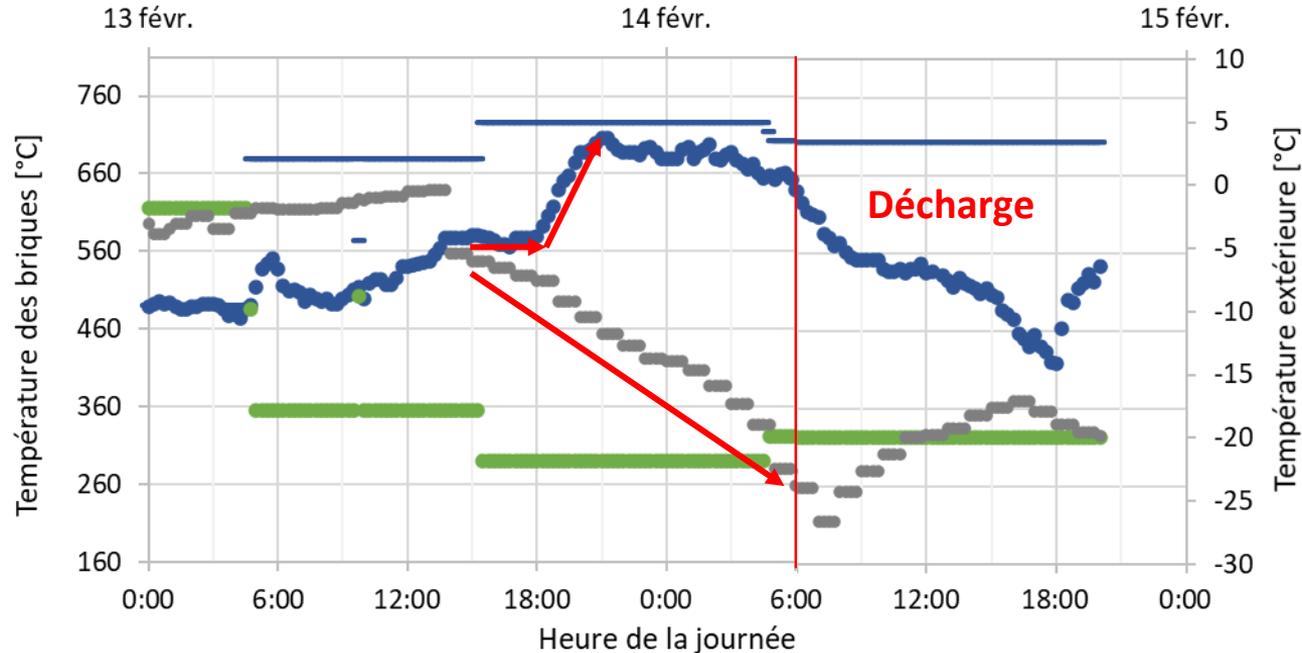
Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

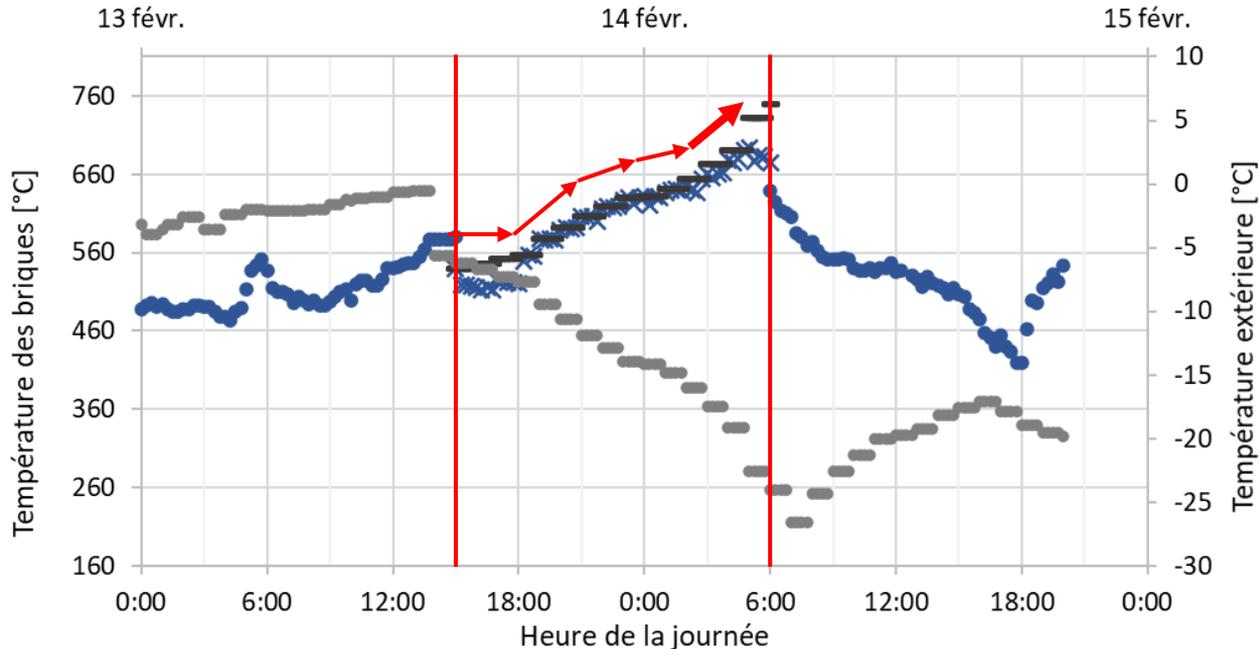
Début de journée (6:00) : Faible puissance élec. dispo., besoins élevés

● Tbriques - Consigne Tbriques (avec prédiction) ● Text (prédiction) ● Text

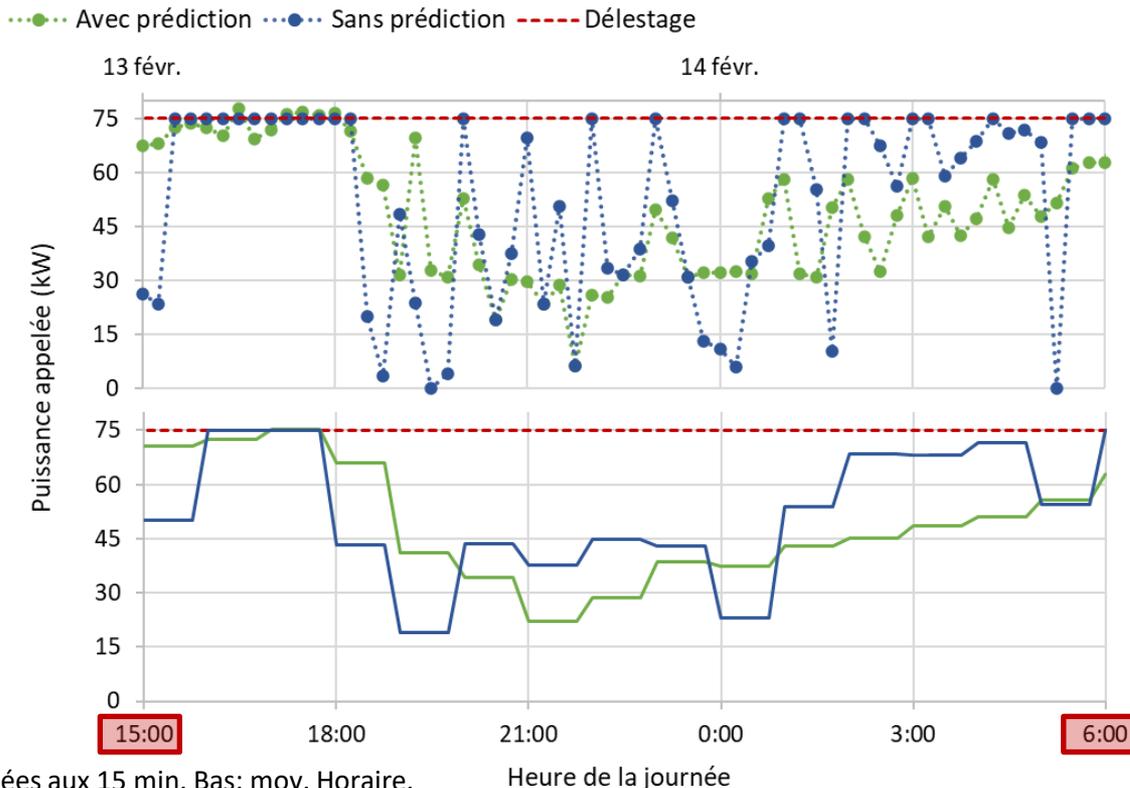


Sans prévision météo... ex : Température ext. actuelle

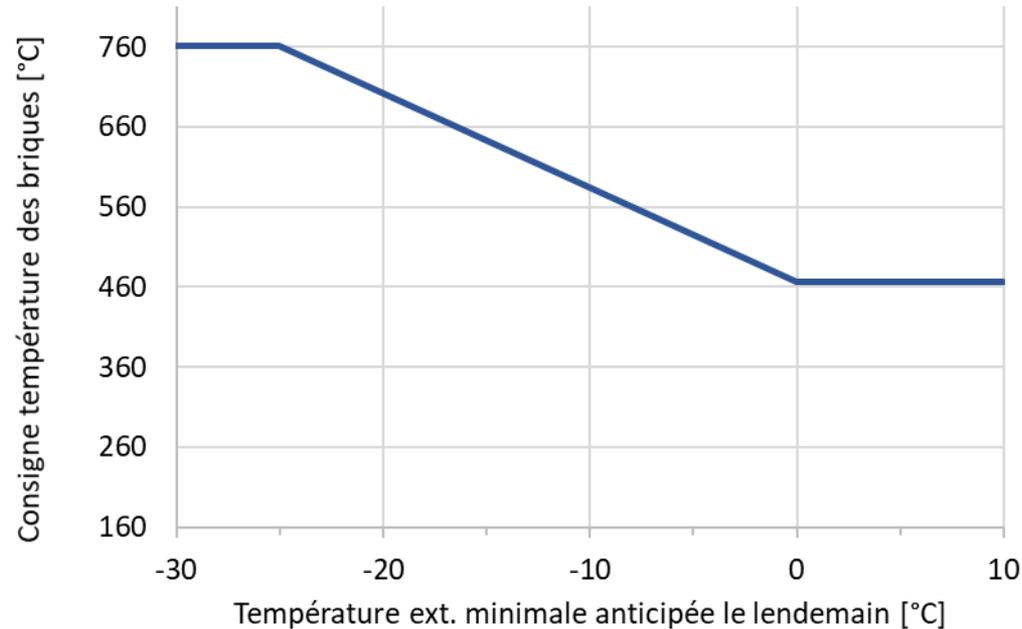
- Tbriques
- × Tbriques (sans prédiction)
- Consigne Tbriques (sans prédiction)
- Text



Sans prévision météo : Puissance appelée bâtiment

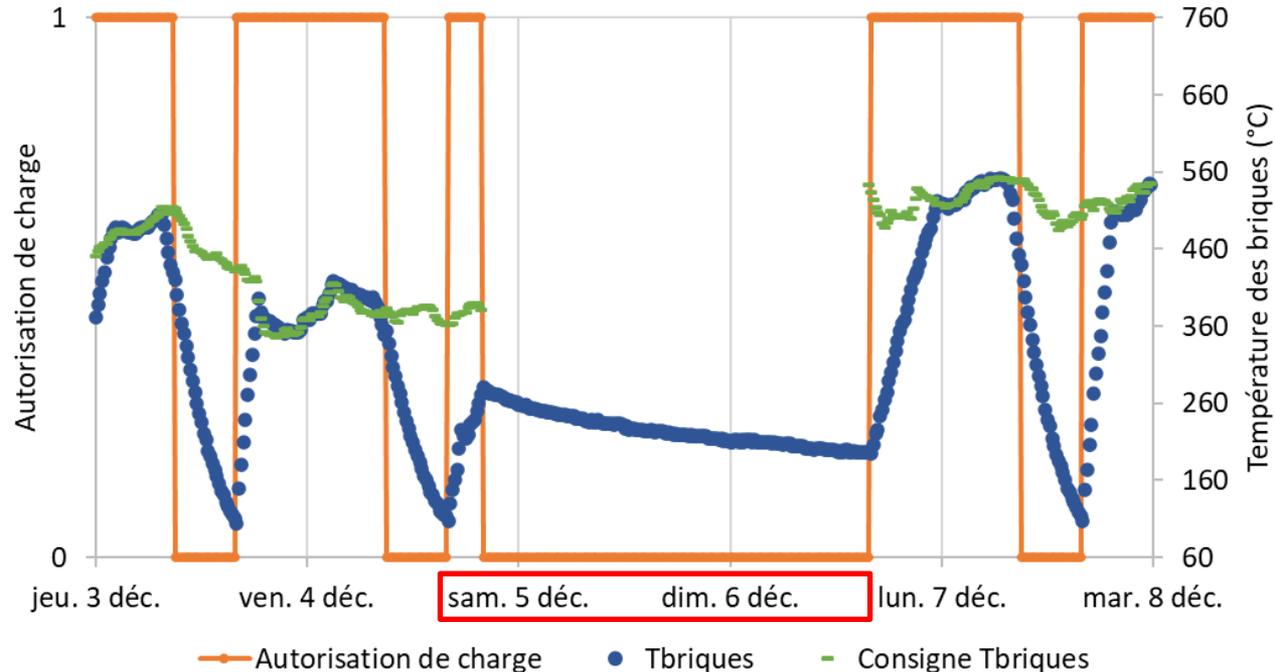


B.P.#3 : Prévoir l'accès aux prévisions météo du jour suivant.



Courbe de consigne de température des briques selon la température extérieure minimale anticipée le lendemain du site #7. À spécifier dans les plans et devis en fonction de ch. application.

B.P.#16 : Limiter la charge avant une période d'inoccupation prolongée.



Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Pratiques actuelles augmentent le travail de **rodage de la séquence de contrôle** pour l'opérateur (1-2 ans après mise en service).

- Courbe Consigne Tbriques vs Text. à ajuster...
- $P_{délestage}$ à définir...
- Événements hors mode normal (panne élec., perte de comm.) à prévoir...
- ↗ combustible 1^{ère} année ; équip. supp. installés et peu utilisés ensuite
- Expertise externe parfois requise

Perception du rodage par les opérateurs :

Part. #1 : « On n'a **pas encore trouvé** la bonne courbe [de consigne Tbriques]. »

Part. #3 : « L'accumulateur va fonctionner **pareil** [même si sous-optimal]. »

B.P.#13 : Transmettre clairement l'**intention** derrière la conception via la **documentation du projet**.

- Utilisation prévue ATC : source dominante, gestion de pointe, besoins desservis
- Paramètres à ajuster ($P_{délestage}$) et à ne pas modifier ($T_{max,briques}$)
- Importance d'optimiser la séquence de contrôle :
 - Quoi optimiser, à quelle fréquence, comment?
 - Discuter avec client : Expertise interne convient ou requis à l'externe?
 - Optimiser la synergie ATC & réseau

R.#6 : Outil simplifié de modélisation à venir...

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Sites caractérisés par :

- Sources de chauffage en place
- Utilisation de l'ATC : source principale ou gestion de pointe
- Usages desservis par le réseau hydronique : Rad, A/N, ECD
- 2 scénarios de substitution retenus : 100% élec. ; biénergie
- Économies : \$, kW, GES

Configuration typique #1

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

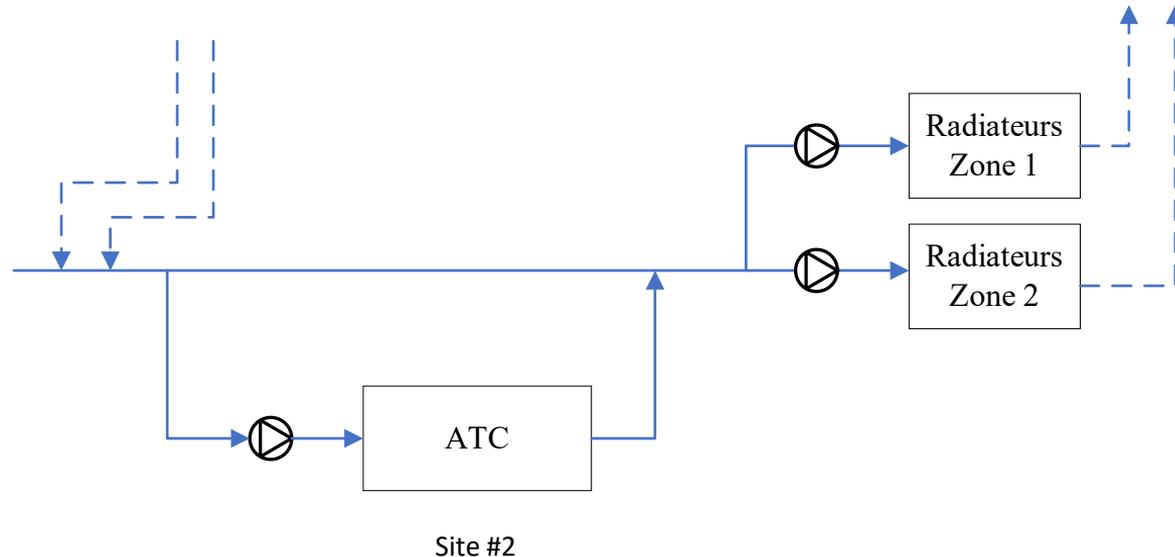
Gestion

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

- Sources de chauffage : ATC seulement
- Source principale : électricité (ATC)
- ATC : source principale
- Usage : Rad



Configuration typique #1

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

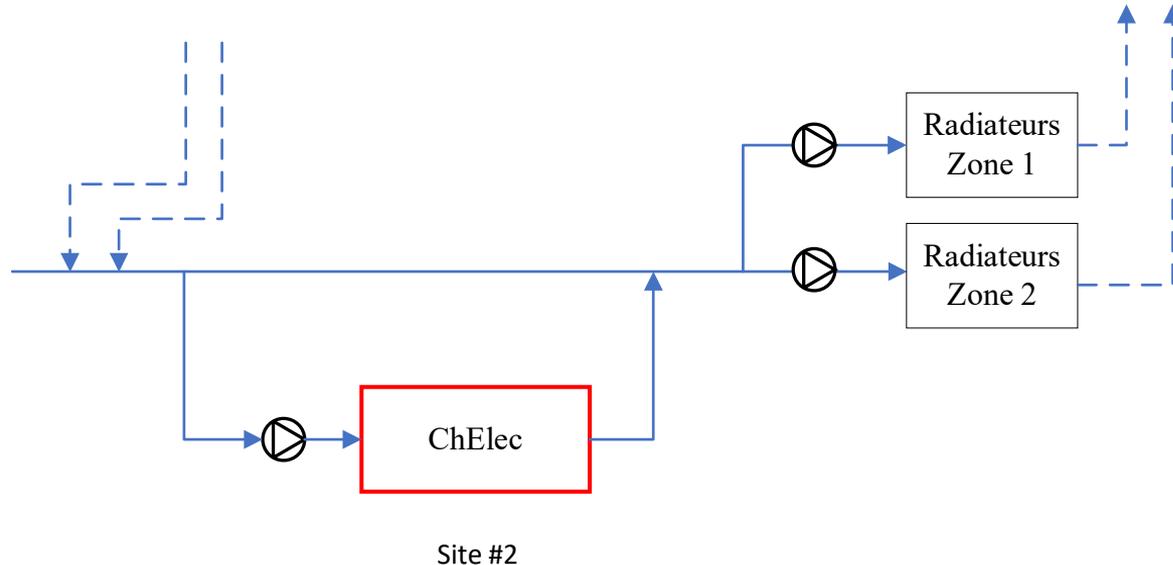
Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Scénario de substitution : 100% électrique

ATC  Chaudière électrique



Configuration typique #1

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

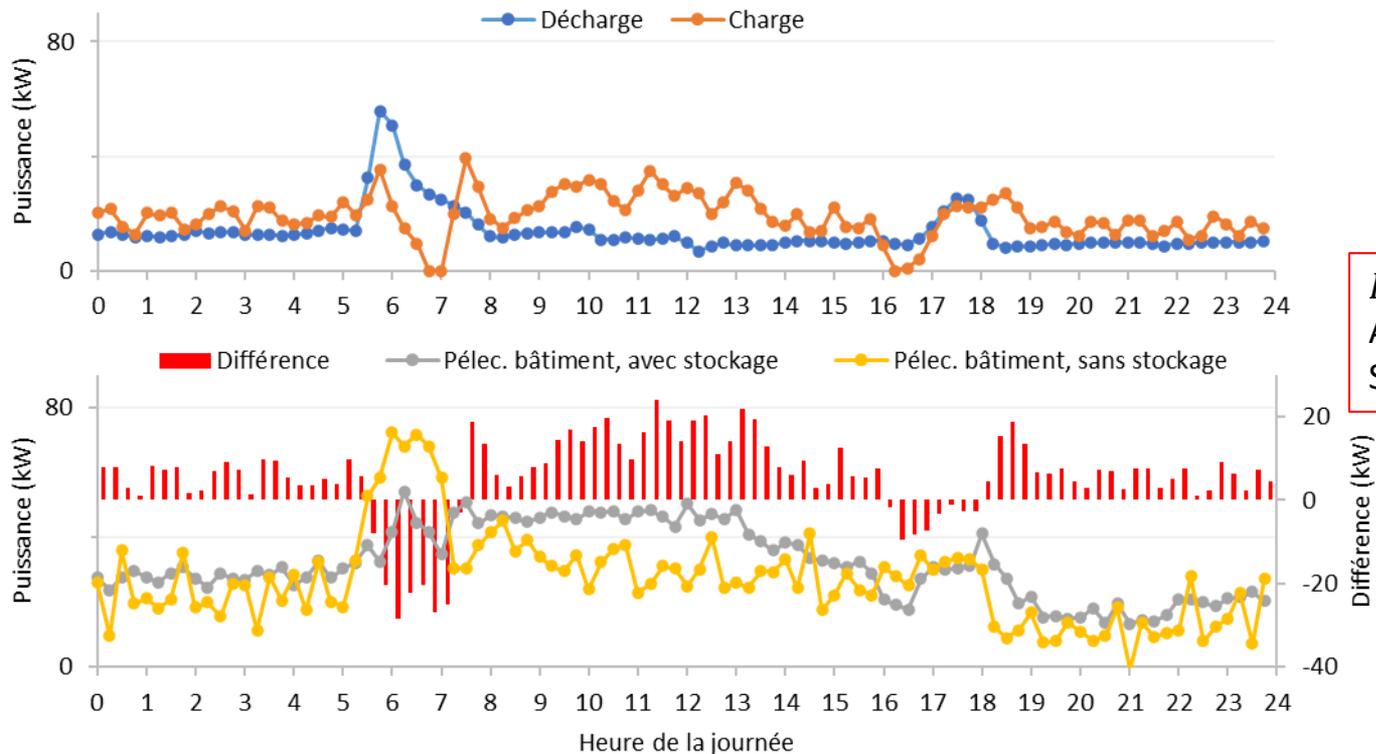
Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Profils avec/sans stockage : 100 % électrique ; Source principale



P_{élec. bâtiment max.}
Avec stockage : 54 kW
Sans stockage : 72 kW

Configuration typique #2

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

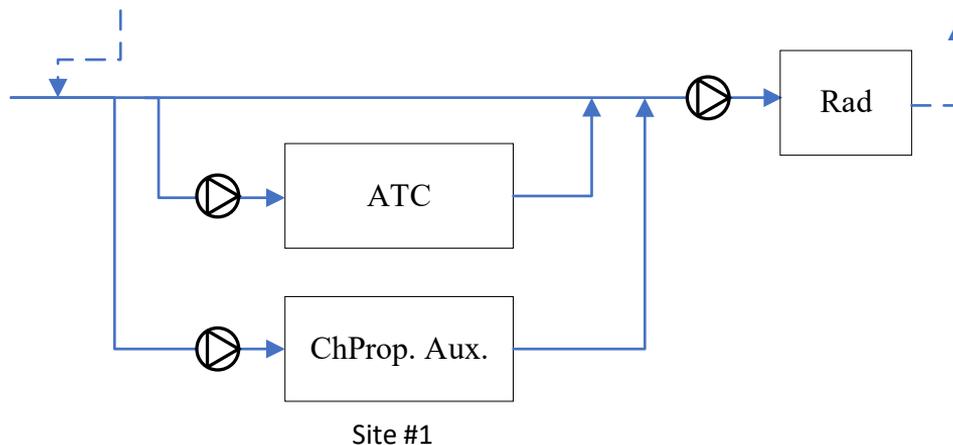
Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

- Sources de : ATC + ChProp
- Source principale chauffage : électricité (ATC)
- ATC : source principale
- Usage : Rad



Configuration typique #2

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Scénario de substitution ... selon critère Exemplarité de l'État

$$CTA_{\text{comb}}/CTA_{\text{total}} < 15\%$$

Biénergie

Pointes → Combustible

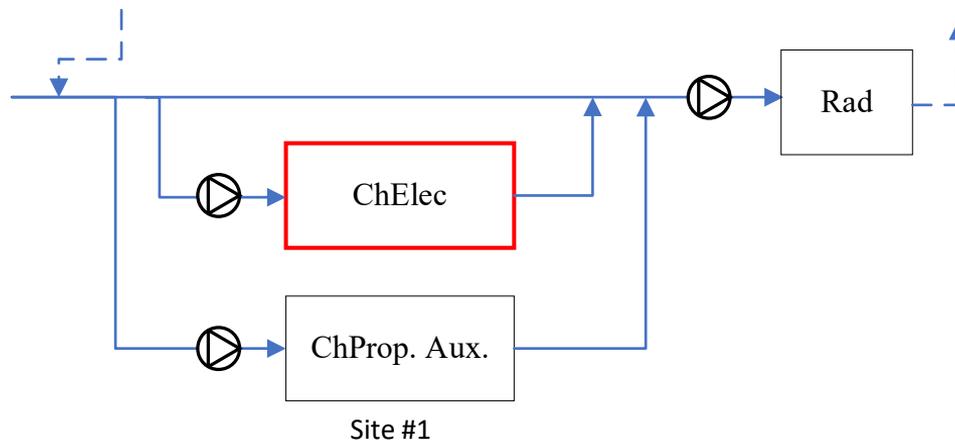
Reste : ATC → Ch. électrique

$$CTA_{\text{comb}}/CTA_{\text{total}} \geq 15\%$$

100% électrique

Cons. combustible inchangée

ATC → Ch. électrique



Configuration typique #3

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

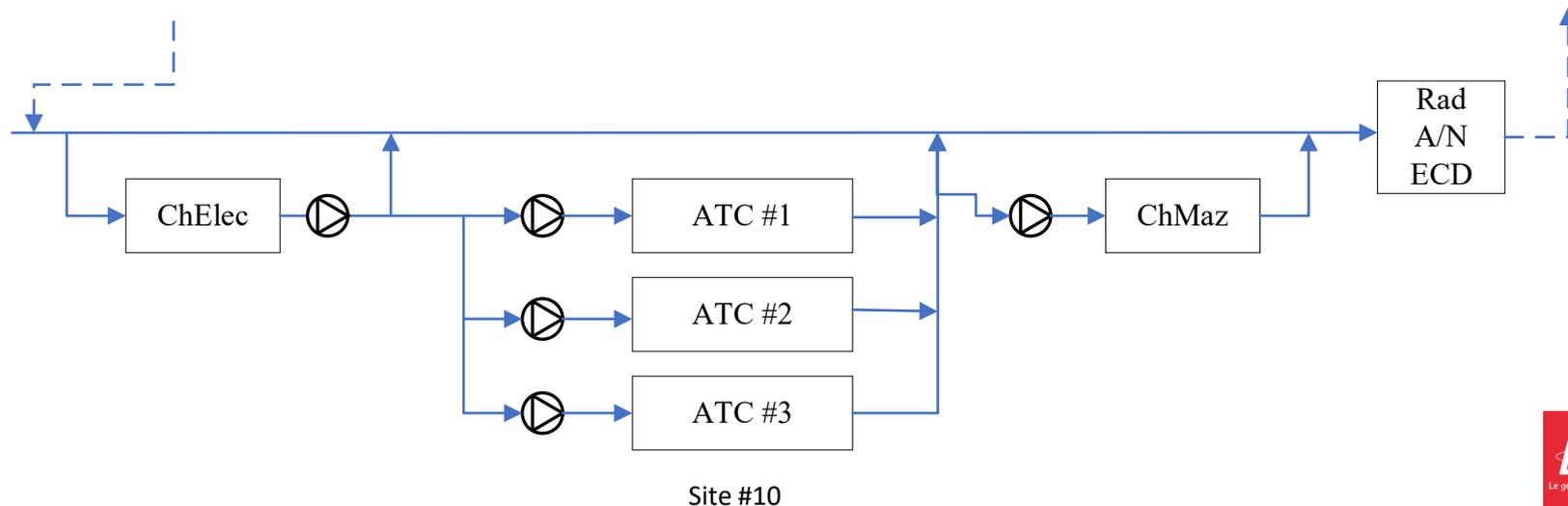
Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

- Sources de chauffage : ATC + ChElec + ChMaz
- Source principale : électricité (ChElec)
- ATC : gestion de pointe
- Usages : Rad + A/N + ECD



Configuration typique #3

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Scénario de substitution ... selon critère Exemplarité de l'État

$$CTA_{\text{comb}}/CTA_{\text{total}} < 15 \%$$

Biénergie

Pointes → Combustible

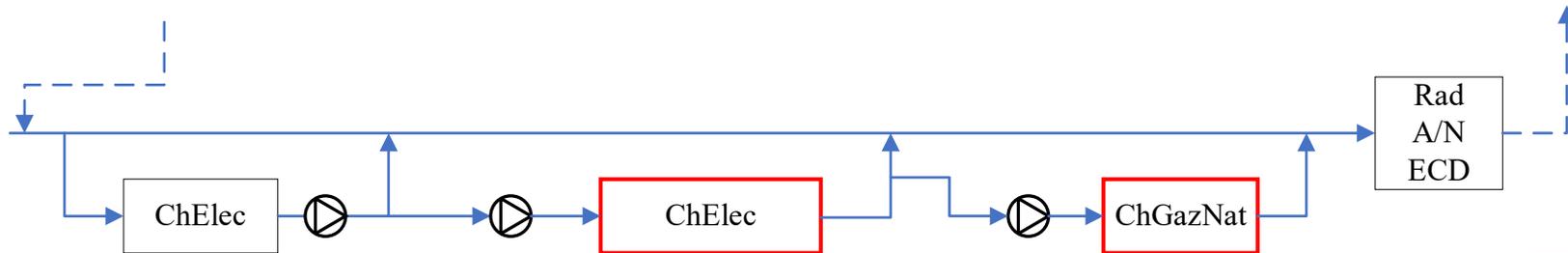
Reste : ATC → Ch. électrique

$$CTA_{\text{comb}}/CTA_{\text{total}} \geq 15 \%$$

100 % électrique

Cons. combustible inchangée

ATC → Ch. électrique



Configuration typique #3

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

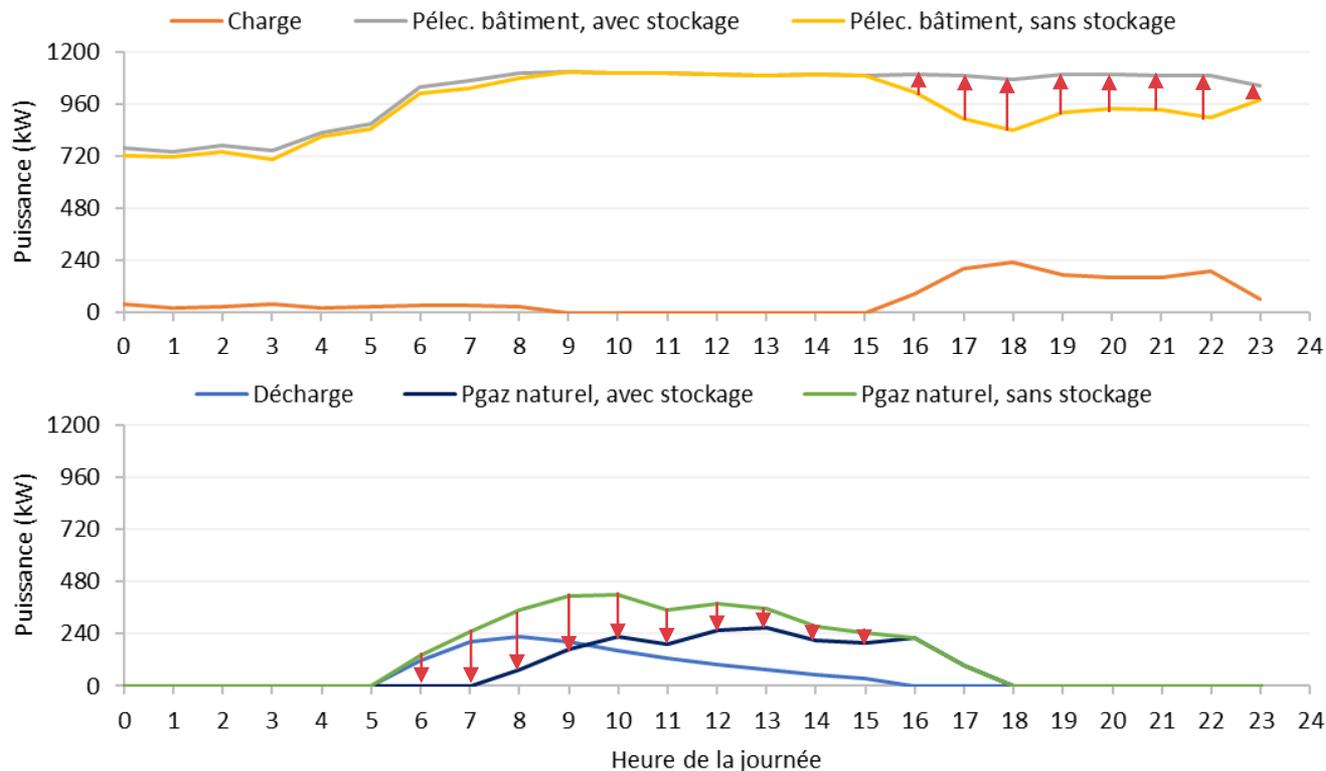
Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Profils avec/sans stockage : Biénergie ; Gestion de pointe



Scénarios de substitution 100% électrique

Usage ATC	No. site	Superficie (m ²)	Réd. Facture	Facture saison sans ATC	Réd. pointe saison	Pointe saison sans ATC	Réd. GES
Source principale	#1	1 438	-2 500 \$	14 000 \$	-51 kW	140 kW	-
	#2	901	-1 500 \$	8 300 \$	-44 kW	101 kW	-
	#18	2 242	-1 600 \$	16 300 \$	-30 kW	92 kW	-
Pointe	#9	7 742	+1 900 \$	48 900 \$	-37 kW	249 kW	-
	#11	18 628	-750 \$	72 550 \$	-19 kW	378 kW	-
	#16	3 704	-2 200 \$	20 600 \$	-68 kW	213 kW	-

Scénarios de substitution Biénergie

Usage ATC	No. site	Superficie (m ²)	Réd. facture	Facture saison sans ATC	Réd. pointe saison	Pointe saison sans ATC	Réd. GES (t. CO ₂ éq)	GES saison sans ATC (t. CO ₂ éq)
Source principale	#4	4 402	-1 400 \$	24 900 \$	-5 kW	162 kW	-21,6	22
Pointe	#10	34 262	+250 \$	160 100 \$	-	1 134 kW	-13	28
Source principale (1) et pointe (1)	#5	3 904	-1 100 \$	22 300 \$	+35 kW	122 kW	-36	38

R.#4 : Que les programmes de subvention disponibles pour l'implantation d'un ATC soient activement publicisés auprès des firmes de génie-conseil, des ESE et des gestionnaires de bâtiments institutionnels.

Programme	Mesures	Appui financier
Solutions Efficaces, HQ	Mesures ↘ cons. électricité chauffage ET ATC sur boucle d'eau chauffée à l'élec.	16 240 \$ par ATC 290 kWh 24 640 \$ par ATC 440 kWh Appuis pour les autres mesures.
ÉcoPerformance, MERN	↘ GES : Retrait et remplacement chaudière au combustible par un appareil élec.	Jusqu'à 75 % des coûts admissibles.

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Enjeux d'O&M constatés	Rendement ATC
Priorité de décharge	ATC #1 (source principale) : 88 % ATC #2 (pointe) : 73 % Même température briques et pertes, mais utilisation différente!
Faible débit d'eau mesuré (25 % valeur nominale)	66 % Utilisation similaire sur d'autres sites : 75 – 85 %
Ventilateur défaillant	0 %... Aucune décharge pendant la saison

→ Fort impact sur la performance

10/16 bonnes pratiques en O&M

En conception, comment faciliter la maintenance?

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

« Les gestionnaires [de systèmes CVCA] ont tellement de systèmes à gérer et de plus en plus complexes, il faut **rendre ça simple [leur opération]**. Quelqu'un qui ne reçoit pas un **message d'alarme**, il ne se rendra pas compte tout de suite du problème et ne pourra pas le corriger [...]. »

- Participant #5, entrevues conception

B.P.#6 :

Implémenter des séquences **dans le BMS** pour **détecter et diagnostiquer** les défaillances de composants.

Retour sur les composants de l'ATC

Contexte, objectifs et
méthode

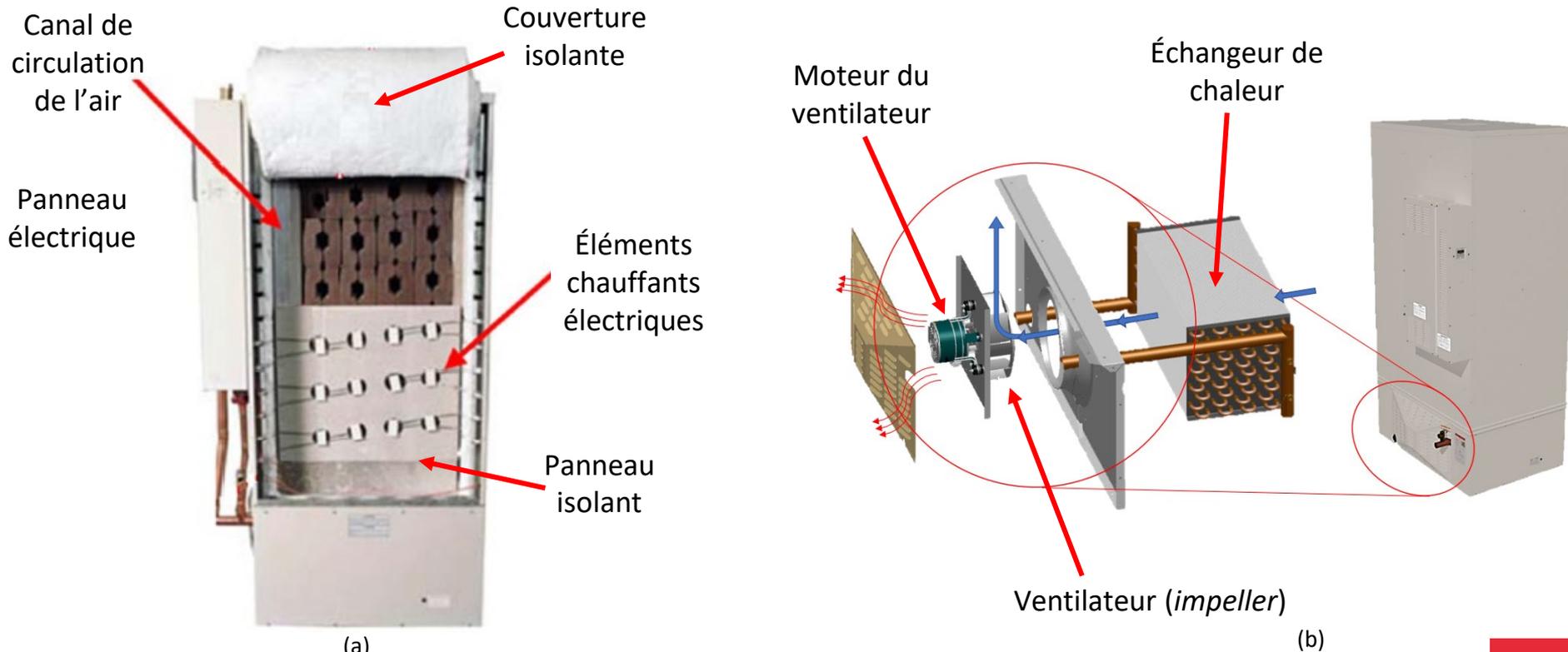
Parc immobilier et
stockage

Gestion

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques



Figures adaptées de :

(a) Steffes Corporation. (2016). Heating Element Service and Repair Guide for 8100 & 9100 Series ThermElect. 8 p.

(b) Steffes Corporation. (2020). Manuel d'utilisation et d'installation, ThermElect hydronique. Modèles 9150, 9180. Version 2.18.

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Composant	Nb. participants	Nb. ATC ¹	Coût approx.	Fréquence	Temps approx.
Moteur du ventilateur	10 / 13	14 / 50	500 – 1 000 \$	1) Après 1-10 ans. 2) Aux 2-3 ans.	1.5 – 4 h
Éléments chauffants ²	3 / 13	4 / 104	800 \$/un. Avec isolant : 1 000-1 250\$/un.	Après 8-10 ans.	1 – 2 jrs (rempl.) + temps arrêt/ redémarrage

¹Données partielles sur le nb d'ATC concernés par les remplacements.

²un. : unité = 1 paire d'éléments chauffants. 18 paires dans le modèle 9180.

ATC source principale de chauffage :

→ Grand nb d'heures d'opération

→ Faible demande de chauf. = basse vitesse

*Cause potentielle à basse vitesse : Courant
appelé supérieur au courant nominal*

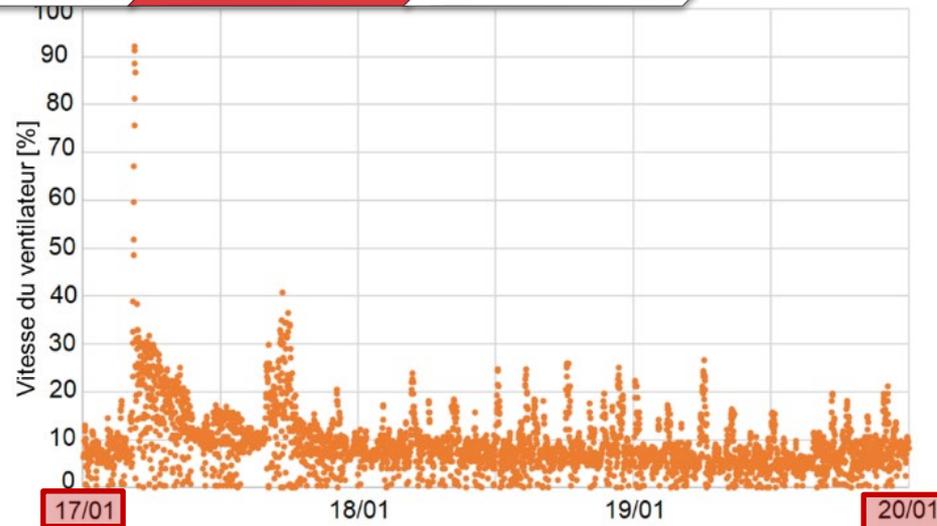


Figure 13 : Vitesse du ventilateur de l'ATC1, site #3, 17 au 20 janvier 2021.

B.P.#7 : Ne pas faire fonctionner le ventilateur de l'ATC à bas régime pendant une **durée prolongée**.

B.P.#8 : Si ATC est la **source principale de chauffage**, prévoir un moteur de ventilateur en inventaire pour remplacement curatif imprévisible.

B.P.#14 : Spécifier aux plans et devis l'utilisation des **extrants** de l'ATC

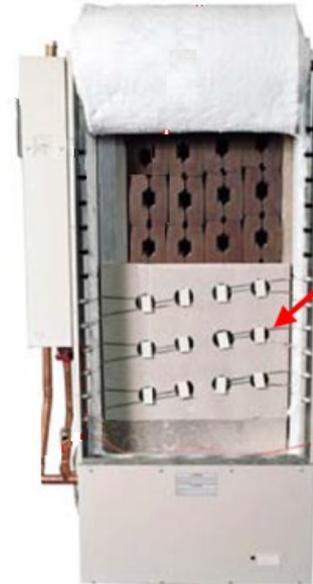
- **Détecter** défaillances/bris composants
- Avertir opérateur via **l'interface du BMS**

Exemple :

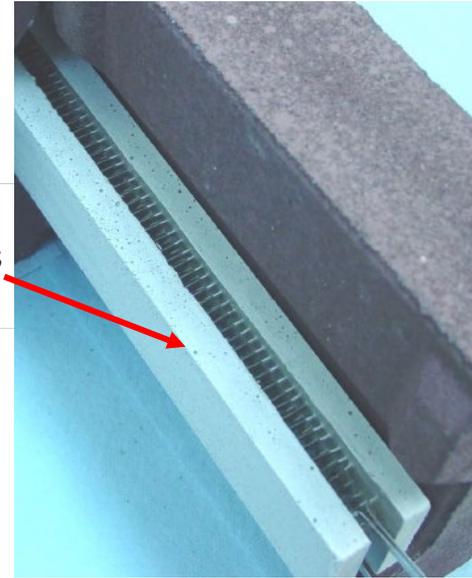
1. Ventilateur activé par l'ATC?
 - Vitesse commandée par l'ATC (*BACnet Loc. L120*)
2. Y a-t-il Décharge?
 - Différence Température entrée/sortie eau ↗
 - Si Charge = 0, Température briques (*L137-139*) ↘
3. Ventilateur défaillant?

Peu de remplacements rapportés,
mais **intervention majeure**

- Mise hors service 2-4 jrs
- Multiples défaillances avant de tous les remplacer (+ de 4-5 un./18)
- Personnel interne ou externe



Éléments
électriques
chauffants



Figures adaptées de :

(a) Steffes Corporation. (2016). Heating Element Service and Repair Guide for 8100 & 9100 Series ThermElect. 8 p.

(b) Desbiens, P.-M., & Groupe Master. (2016). L'accumulateur thermique. Communication présentée au Colloque Multi Énergies, Québec (Qc), Université Laval.

B.P.#4 : Ne pas maintenir l'ATC à haute température (>700°C) pendant des périodes prolongées.

Consigne mensuelle :
760°C

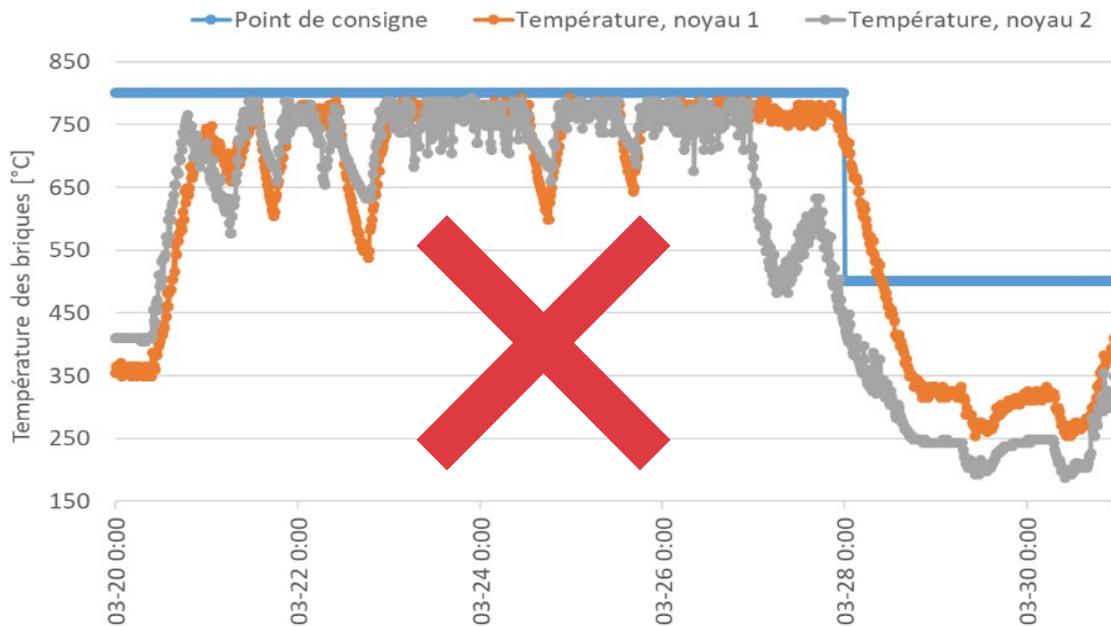


Figure 16: Opération d'un accumulateur ThermElect9150 sur la base d'une consigne mensuelle de niveau de charge (site #18).

Éléments chauffants : Durée de vie attendue

Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

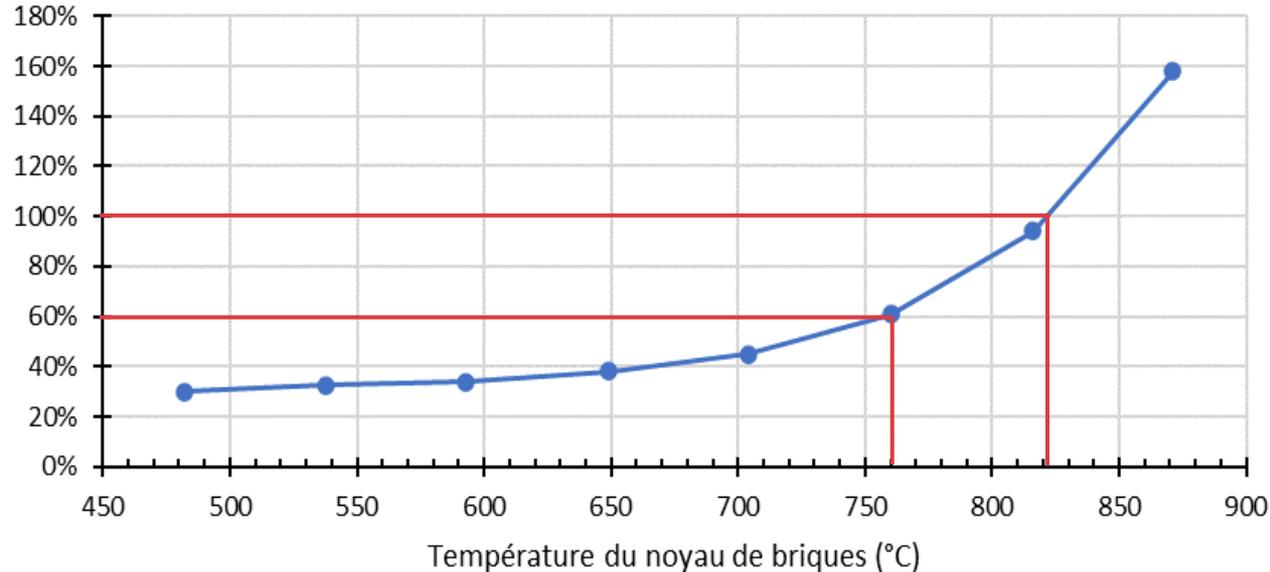
Conception à
opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

Pourcentage d'éléments chauffants à remplacer sur un
cycle de 10 ans (%)



Contexte, objectifs et
méthode

Parc immobilier et
stockage

Conception à
opération

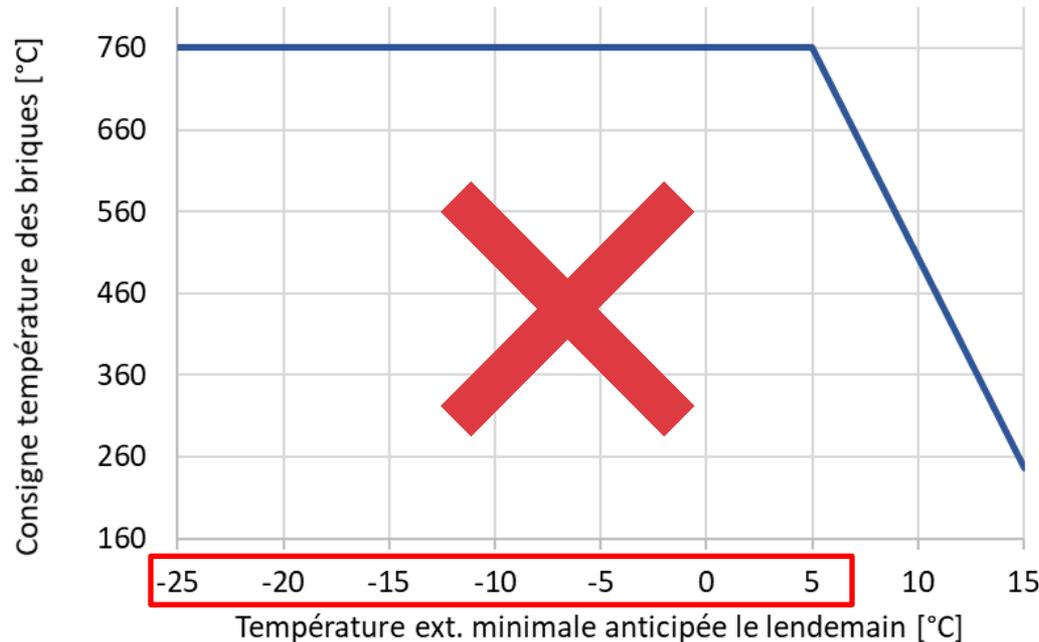
Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

B.P.#4 : Ne pas maintenir l'ATC à haute température ($>700^{\circ}\text{C}$) pendant des périodes prolongées.

Courbe devis :
 760°C ~tout
l'hiver (-25 à
 $+5^{\circ}\text{C}$)



B.P.#14 : Spécifier aux plans et devis l'utilisation des extrants de l'ATC
+ Instrumentation requise : **Mesure puissance électrique appelée par l'ATC**

Exemple :

1. Charge activée?

- Température briques (L137-139) ↗ vers Consigne
- Nb d'éléments chauffants sous tension (L147-149)
- Modulation puissance électrique pour la charge
- Calcul puissance appelée

2. Mesure puissance appelée

3. Calcul vs Mesure : éléments défaillants?

Contexte, objectifs et méthode

Parc immobilier et stockage

Conception à opération

Performance

Maintenance

Bonnes pratiques

- Stockage thermique :
 - Besoins thermiques en Puissance **ET** Énergie
 - Contrôle prédictif : ajouts « simples » aux séquences
- Élaborer ++ la séquence de contrôle : Données d'opération réseau de chauffage existant (Profil $\leq 1h$)
- Intention de Conception ► Opération :
 - Utilisation ATC
 - Paramètres de contrôle à/ne pas modifier
 - Optimisation et impact sur performance
- Interface BMS : Utiliser extrants de l'ATC et prévoir l'instrumentation ext. requise aux plans et devis.
- Précautions liées à l'O&M : moteur du ventilateur, éléments chauffants.

Les auteurs tiennent à remercier :

Étudiants-chercheurs :

Milena Kalzou Baré

Julien Charbonneau

Sullivan Danjou

Julien Drouet

Eyé Imelda Ido

Abdelkrim Makhoulf

Eve Patricia Ngangsop Ngopjop

Personnel de :

Centres de services scolaires (CSS)

Newtech Électricité

Direction de l'exploitation des immeubles de la
Société québécoise des infrastructures (SQI)

Expertise énergétique d'Hydro-Québec

Steffes Corporation

Contrôles AC Inc.

Bouthillette Parizeau

Ecosystem

EXP

GBI

Johnson Controls

LGT

Ponton Guillot

Contact :

katherine.davignon@etsmtl.ca