



Puits à colonne permanente: leçons apprises après un an d'opération à l'école de la Clé-des-champs à Mirabel

18 octobre 2023



**POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE



Puits à colonne permanente: leçons apprises après un an d'opération à l'école de la Clé-des-champs à Mirabel



Présenté par :

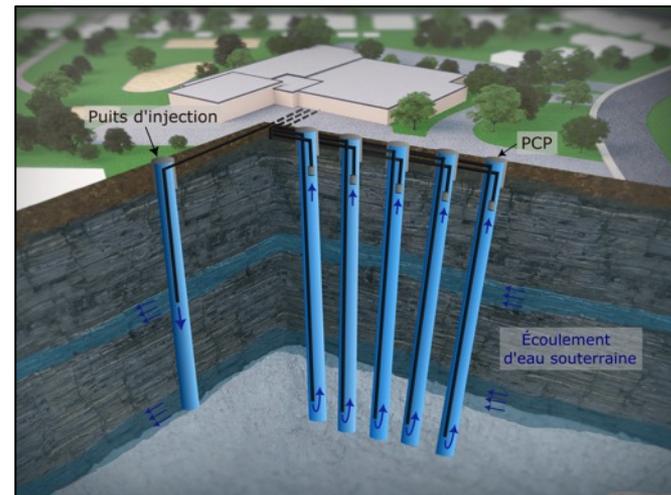
Gabrielle Beaudry, CPI, Ph.D.
Associée de recherche
Polytechnique Montréal



Chaire de recherche
en géothermie sur
l'intégration des PCP dans
les bâtiments institutionnels

Plan de la présentation

- Les puits à colonne permanente : mise en contexte
- Démarrage d'un projet de démonstration à l'école de la Clé-des-champs
- Conception
- Construction
- Opération
- Perspectives



La géothermie

La géothermie de basse température est applicable dans le contexte québécois :

- Température du sol < 30°C
- Couplage de puits géothermiques à une thermopompe
- Réduction de la consommation énergétique (kWh) pour le chauffage et la climatisation
- Diminution de la puissance électrique appelée (kW) indépendamment de la température extérieure

Accord de Paris : le Canada encore loin de ses objectifs de réduction de GES



 RADIO-CANADA
avril 2018

La Ville de Montréal devance de 10 ans sa cible pour des bâtiments zéro émission



 RADIO-CANADA
mai 2022

Hydro-Québec a besoin de plus d'électricité



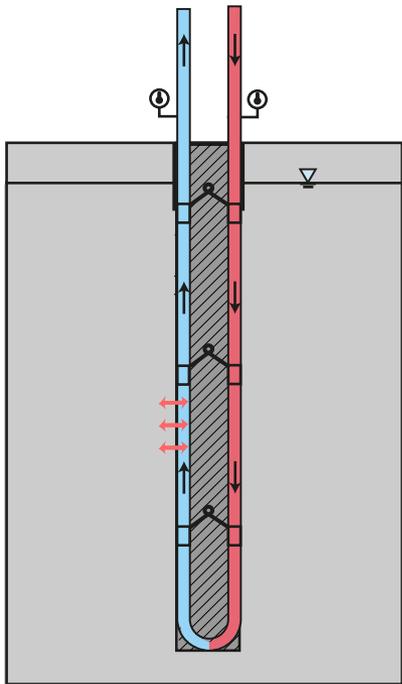
 LA PRESSE

novembre 2021

On retrouve différentes configurations de puits géothermiques :

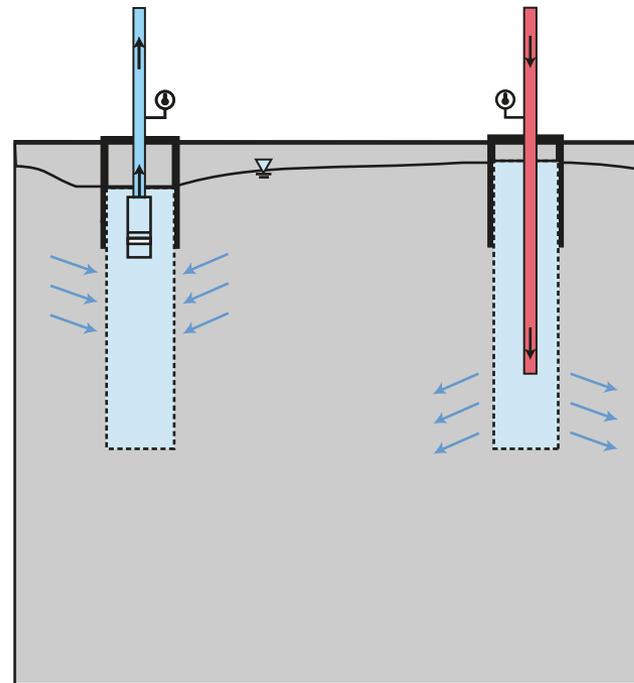
Boucles fermées

- Conduction \longleftrightarrow
- Technologie éprouvée
- Nombre de puits élevé



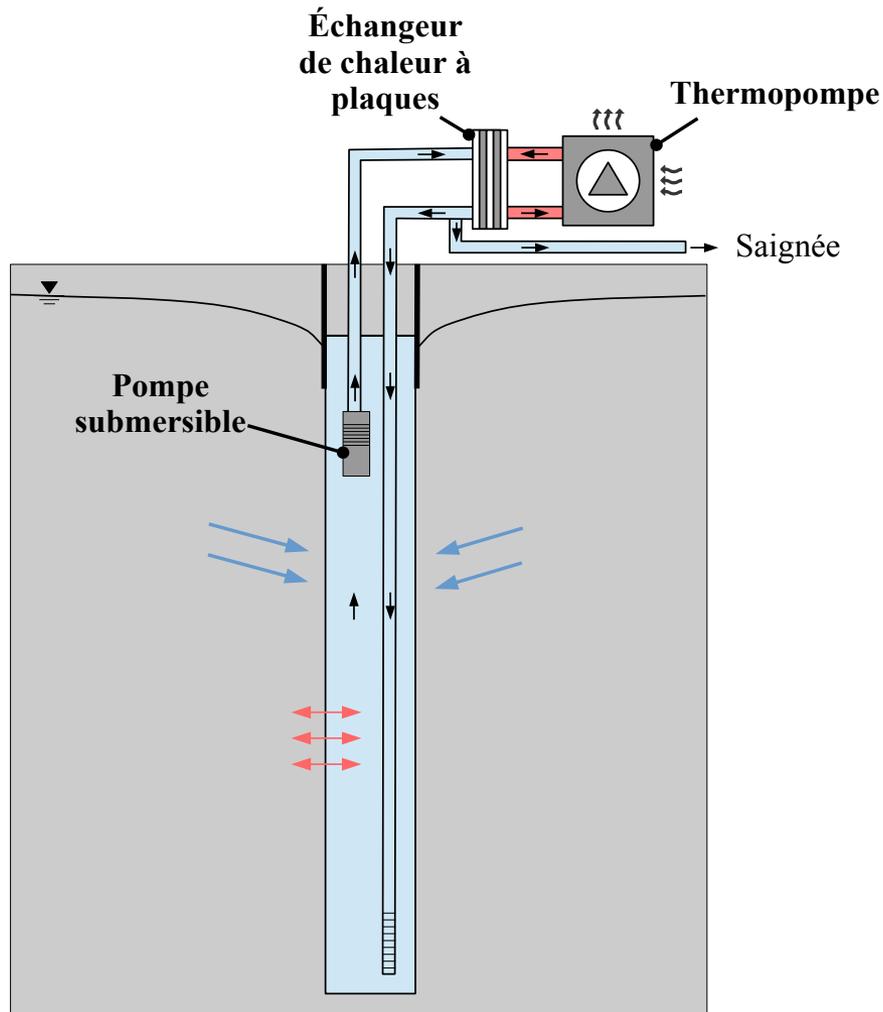
Boucles ouvertes

- Advection \longrightarrow
- Grande efficacité
- Aquifère productif requis
- Enjeux de qualité de l'eau



Les puits à colonne permanente

Les puits à colonne permanente offrent un compromis entre les boucles ouvertes et fermées :



- Conduction \leftrightarrow et advection \rightarrow
- Bonne efficacité
- Grande profondeur
- Superficie requise plus faible
- Pas besoin d'un aquifère productif
- Qualité de l'eau moins critique que pour les boucles ouvertes

→ Grand potentiel pour les milieux urbains denses

Les puits à colonne permanente aux États-Unis

Les PCP sont installés au nord-est des États-Unis depuis les années 1990. Des études mentionnent des **réductions possibles de la longueur totale de forage requise (49-78%) et des coûts de construction (32-80%)** par rapport aux puits en boucle fermée.

Source : O'Neill et al. (2006). Performance analysis of standing column well ground heat exchanger systems.

Geothermal Heat Pump Systems Manual <small>A Design and Installation Guide for New York City Projects</small>	Boucle fermée	Boucle ouverte	PCP
Profondeur	60-150 m 200-500 pi	45-90 m 150-300 pi	450-550 m 1500-1800 pi
Espacement entre les puits	6 m 20 pi	45-75 m 150-250 pi	15-25 m 50-75 pi
Capacité d'installation	50-80 W/m 2,2-3,3 ton/500 pi	300-600 W/lpm 100-200 ton/300 gpm	105-300 W/m 15-43 ton/500 m
Température du fluide - chauffage	-1-4 °C 30-40 °F	2-7 °C 35-45 °F	2-10 °C 35-50 °F
Température du fluide - climatisation	21-32 °C 70-90 °F	18-30 °C 65-85 °F	18-27 °C 65-80 °F

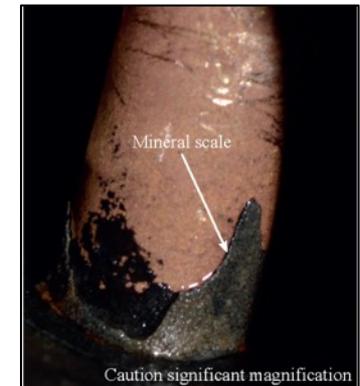
Tableau inspiré de : NYC Department of Design + Construction (2013). Geothermal Heat Pump Systems Manual.

Est-ce que ces informations sont transposables au contexte québécois?

Les puits à colonne permanente au Québec

Un système expérimental est installé à Varennes depuis 2016 :

- Un PCP (300 m) et un puits d'injection (150 m)
- Le système fournit en chauffage une **puissance de pointe de 180-240 W/m** avec une saignée modérée
- Des copeaux de HDPE obstruent la pompe submersible
- Eau stagnante = légère déposition de calcite



Source : Cerlet et al. (2020)

Comment se comportent les PCP dans un véritable contexte opérationnel ?

Démarrage d'un projet de démonstration institutionnel

Un premier projet de démonstration est mis sur pied en 2020 pour l'installation d'un système de PCP dans un bâtiment scolaire.

Critères de sélection du site :

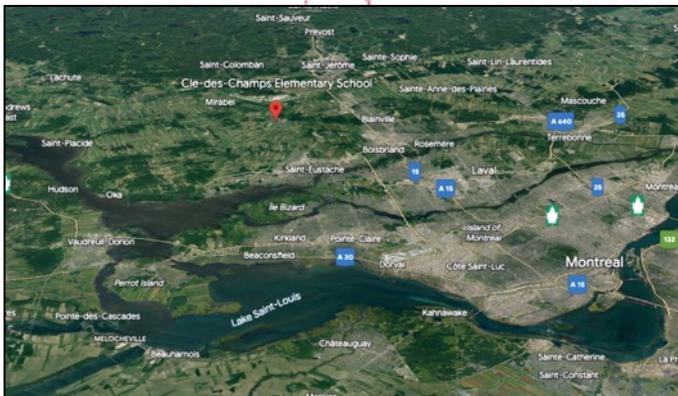
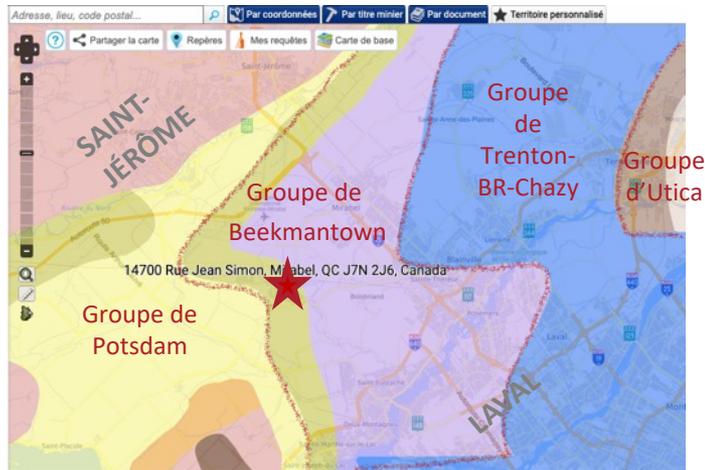
- Profondeur du roc et de l'eau souterraine : < 30 m
- Présence d'un aquifère productif non requise mais améliore l'efficacité potentielle
- Bonne qualité d'eau souhaitable (matières en suspension, Fe, Mn, bactéries, potentiel corrosif)

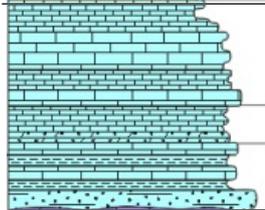
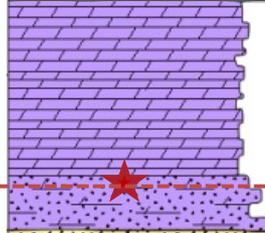
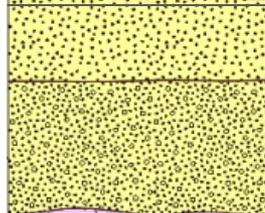


Sources d'information : PACES, SIH, SIGEOM, foreurs, expérience

Sélection du site

La région du nord-ouest du fleuve Saint-Laurent est caractérisée par des conditions géologiques et hydrogéologiques intéressantes pour les PCP.



	Groupe géologique	Lithologie	Présence d'eau
	Utica	Shales	--
	Trenton	Calcaires	-
	Black River Chazy		
	Beekmantown	Dolomies	+-
	Potsdam	Grès	++

Adapté de : Bédard et al. (2013). Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Projet de démonstration retenu : Remplacement des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air à l'école de la Clé-des-Champs à Mirabel



- Ancien système :
- Combiné mazout léger et électricité
 - $\sim 12\text{-}65$ tonnes CO_2, eq par année
 - Puissance appelée maximale ~ 90 kW



- Projet retenu :
- Couverture de 100% des charges du bâtiment par la géothermie PCP
 - 1 thermopompe eau-eau
 - 1 chaudière électrique en redondance
 - Aussi : 3 thermopompes eau-air, récupérateur d'énergie, convecteurs périmétriques basse température, contrôles centralisés, etc.

Terrain : ~ 11500 m²
Cour d'école : ~ 1200 m²
Stationnement : ~ 1400 m²
Bâtiment : 2780 m²

Forage exploratoire

Forage d'un puits exploratoire (août 2020) :

- Grès de Potsdam très abrasif retrouvé à partir de 100 m
- Venues d'eau très élevées (1350 L/min) forcent l'arrêt du forage à 133 m
- Profondeur du roc = 10 m
- Profondeur du niveau de l'eau souterraine = 2,4 m



Leçon 1 : Le forage exploratoire permet de mieux définir les conditions de chantier, le potentiel du site et les contraintes de conception.

Investigation de site

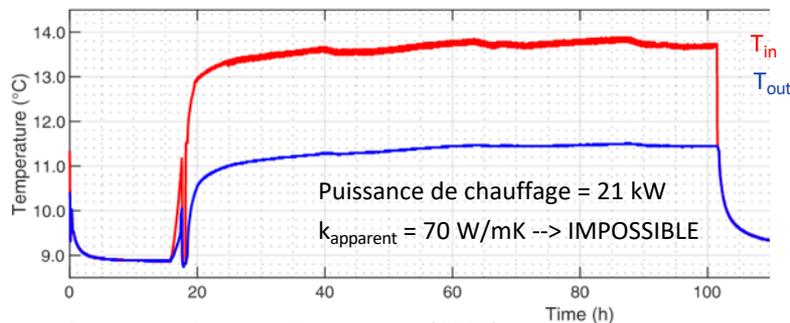
Essais réalisés (automne 2020) :

- Mesure du profil de température initial
- Essai de pompage
- Échantillonnage de l'eau
- Essai de réponse thermique

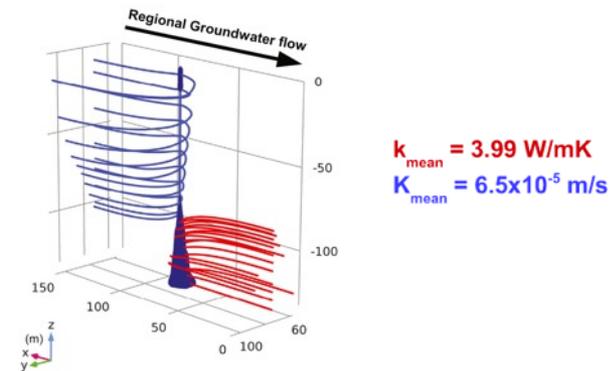


Résultats :

- **Modèle de simulation avancé nécessaire** pour l'interprétation de l'essai de réponse thermique !



Source des images : Robert et al. (2022)

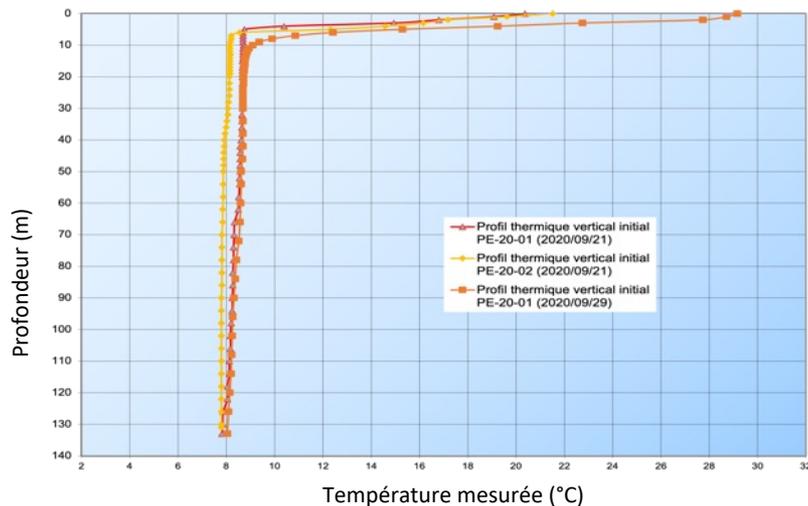


Leçon 2 : Un modèle de simulation avancé permet de considérer le transfert de chaleur advectif dans les PCP.

Investigation de site

Résultats (suite) :

- Profil de température initial homogène ~ 8,5 °C
- Très bonne conductivité hydraulique permettant une utilisation efficace de la saignée
- Eau assez dure avec un faible potentiel d'entartrage et de corrosion



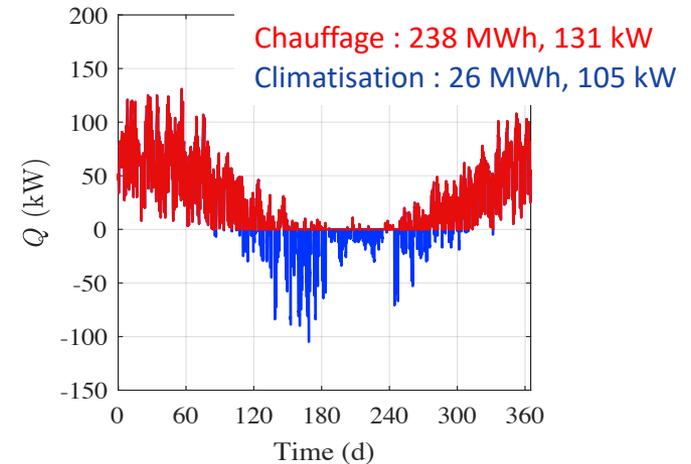
Paramètre d'analyse de l'eau souterraine	Résultat
Dureté	290 mg/L
Fer	0,27 mg/L
Manganèse	0,014 mg/L
Sulfates	60 mg/L
Bactéries du fer et sulfato-réductrices	Aucune
Dénombrement total BHAA	63 UFC/ml
Bactéries atypiques	9 UFC/100ml
Coliformes totaux	51 UFC/100ml
Indice de Ryznar (RSI)	6,8
Indice de Langelier (LSI)	0,49

Leçon 3 : Le programme d'essai permet d'obtenir les paramètres de conception et d'évaluer le risque environnemental relié à l'opération du système (nécessaire pour la demande de CAE).

Dimensionnement du champ de PCP

Utilisation du modèle numérique pour simuler la température de l'eau souterraine en fonction des charges thermiques horaires prévues pour le bâtiment :

- Un dimensionnement **conservateur** est retenu, soit **5 PCP + 1 puits d'injection** de 135 m
- En comparaison, un dimensionnement en boucle fermée aurait requis **22 puits** de 135 m



Leçon 4 : Le profil de charge du bâtiment et l'équilibre des charges de chauffage et climatisation a une grande influence sur le résultat du dimensionnement.

*Leçon 5 : 3,7 x moins de puits sont requis par rapport à un système en boucle fermée, ce qui correspond à une **diminution de la longueur totale de forage de 73%**.*

Séquence des travaux

- Forage de 4 PCP et 1 puits d'injection de 135 mètres (5 – 14 juillet 2021)
- Travaux extérieurs : excavation, installation des conduits horizontaux, électricité, remblai, pavage (28 juin – 13 sept. 2021)
- Travaux intérieurs : construction de la salle mécanique, etc. (28 juin – 2 novembre 2021)
- Mise en marche de la thermopompe géothermique eau-eau (avril 2022)
- Construction du système de climatisation : serpentins, thermopompes eau-air, etc. (28 juin 2022 – 14 avril 2023)



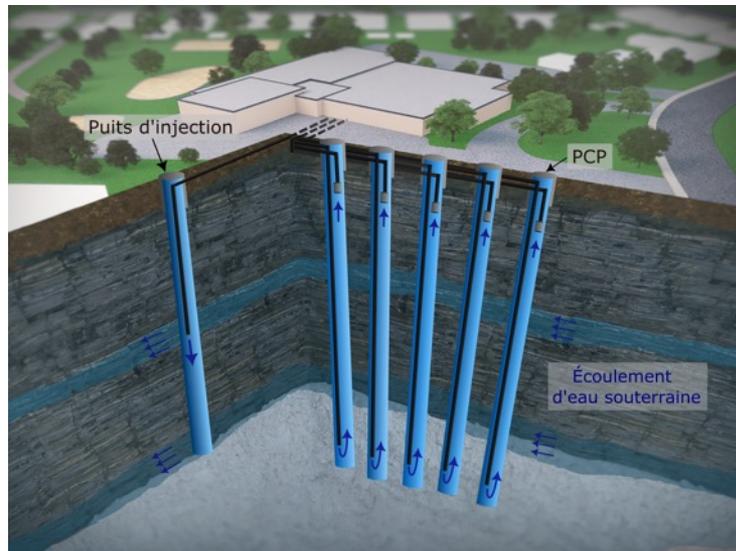
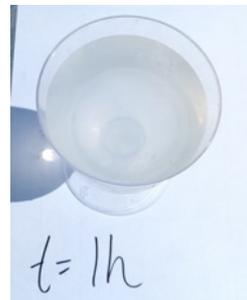
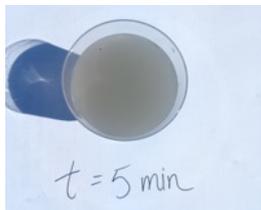
Source des images : gbi

Construction de l'échangeur géothermique



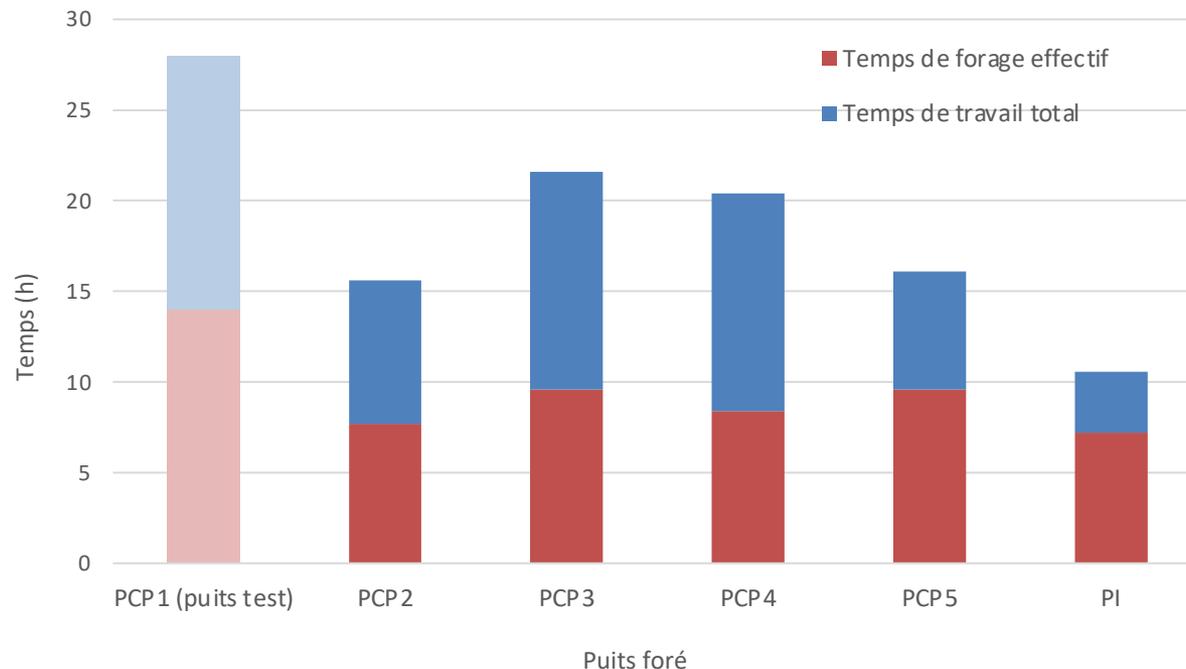
Source de l'image : gbi

Source de l'image : gbi



Construction de l'échangeur géothermique

Les travaux de forage ont été complétés en **84 heures de travail** à l'été 2021.

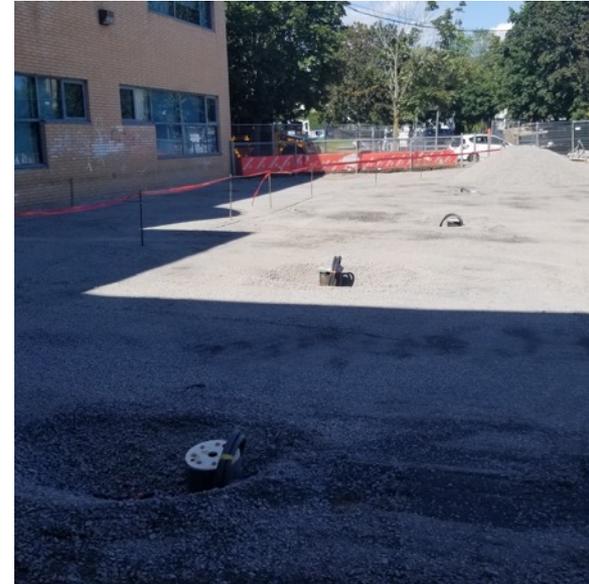


- 2 foreuses en simultané sur le site = seulement 7 jours pour compléter les travaux
- Environ **231 heures** de travail pour un système équivalent en boucle fermée

Leçon 6 : La durée des travaux de forage est raccourcie d'environ 60% par rapport à un système équivalent en boucle fermée.

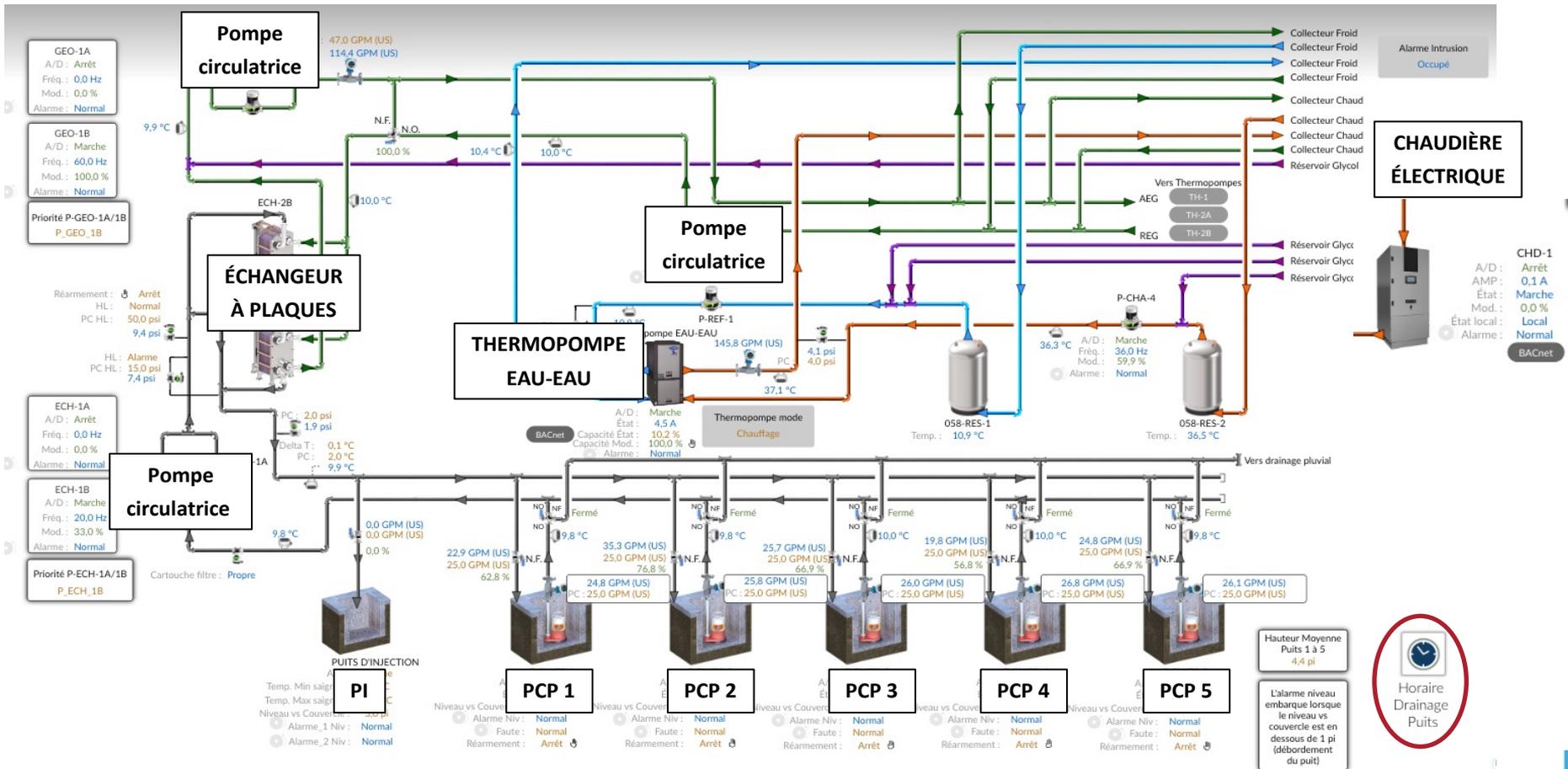
Coûts de construction

- Les coûts des travaux de mécanique, électricité et civil liés à la géothermie représentent 7% du coût total du projet.
- Les coûts de construction de l'échangeur géothermique sont réduits d'environ 19-47 % par rapport à un système en boucle fermée pour un projet équivalent.
- Possibilité d'économies d'échelle supplémentaires.



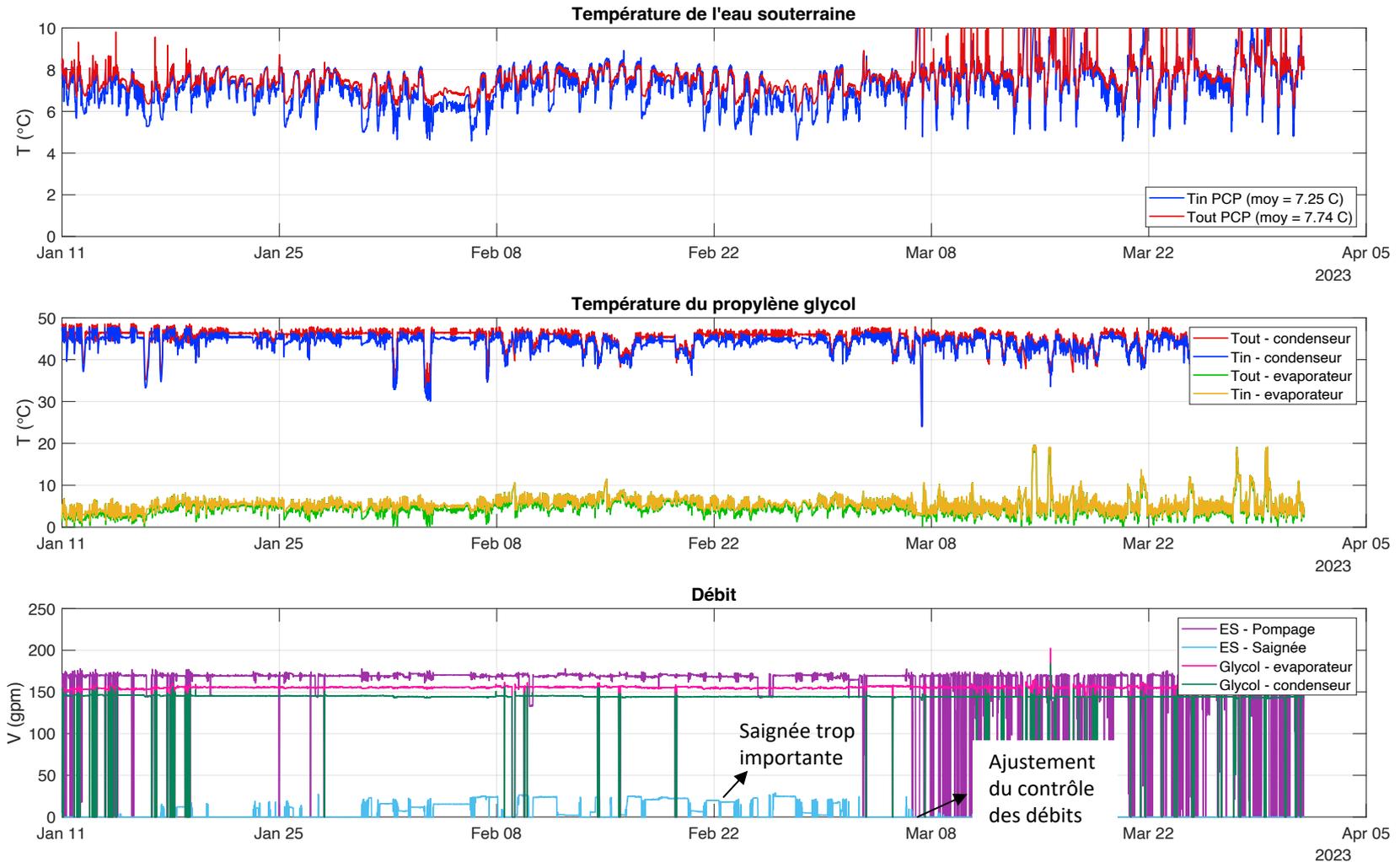
*Leçon 7 : Dans le contexte étudié, les PCP permettent de **réduire les coûts de construction d'environ 19-47 %** par rapport à un système équivalent en boucle fermée.*

Suivi des données d'opération

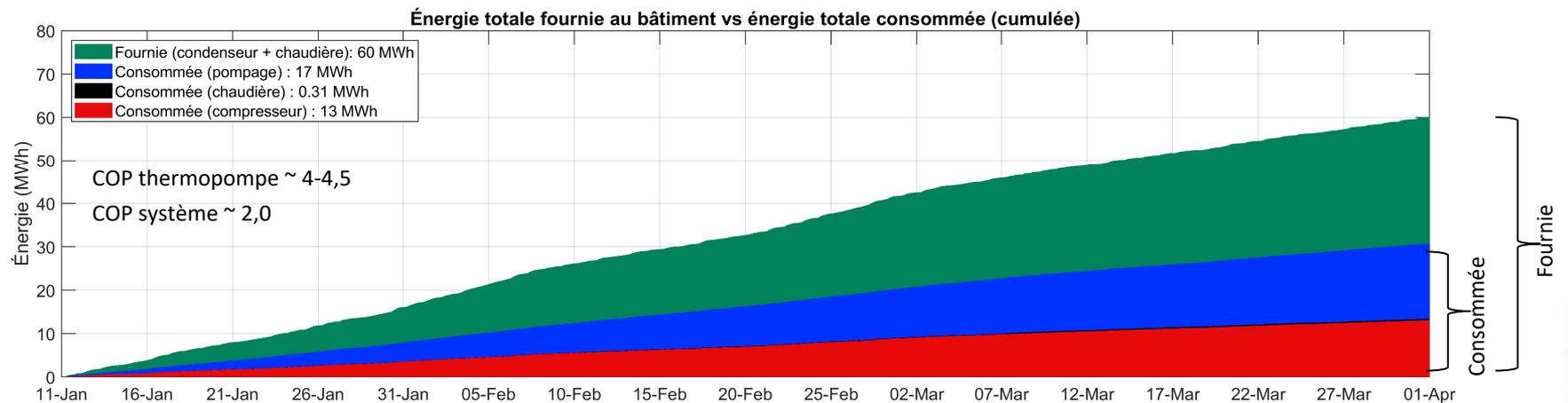
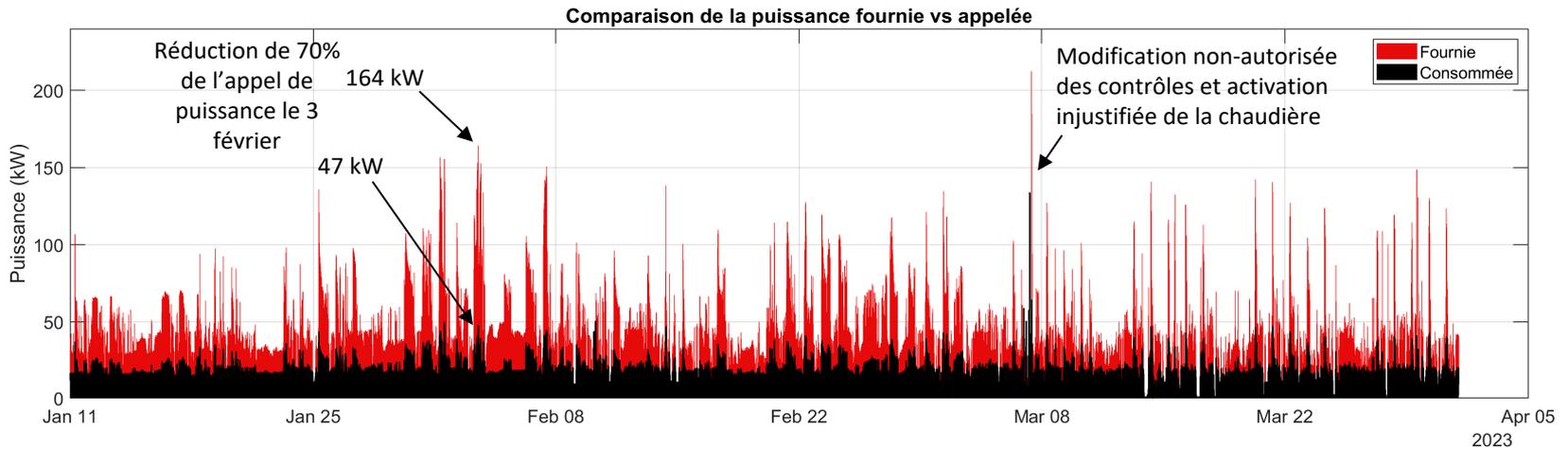


Données d'opération brutes

Période d'opération représentative en chauffage entre le 11 janvier et le 1^{er} avril 2023.



Analyse des données d'opération



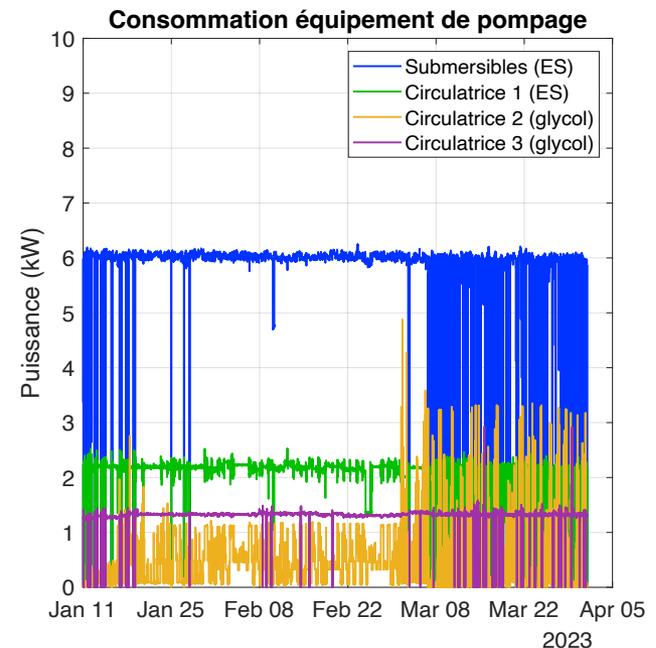
Enjeux opérationnels

Des problèmes d'approvisionnement et un problème avec les variateurs de fréquence a forcé le pompage à débit constant :

- Énergie de pompage (17 MWh) > énergie au compresseur (13 MWh)
- Le pompage à débit variable pourrait permettre de réduire jusqu'à 75% la consommation des pompes et 20% la consommation énergétique du système

Source : Beaudry et al. (2022). Flow rate control in standing column wells.

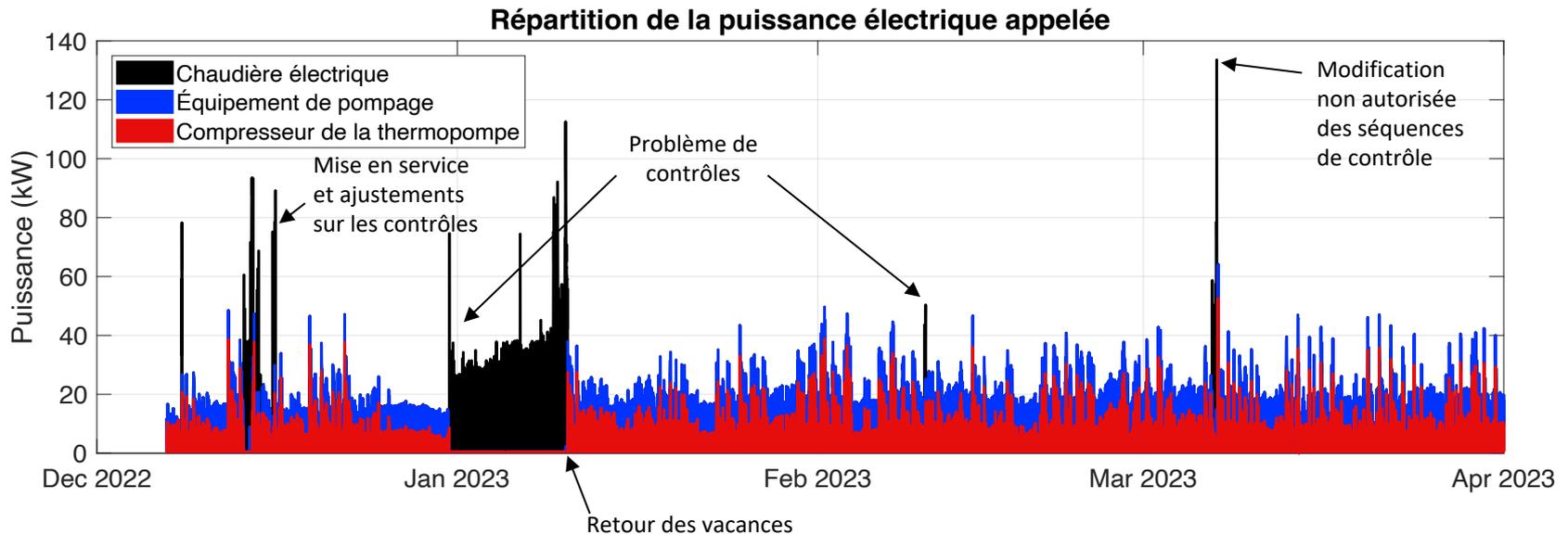
- COP actuel (débit constant) = 2,0
- COP anticipé (débit variable) = 2,4



Leçon 8 : L'énergie de pompage peut représenter une proportion importante de la consommation énergétique du système.

Enjeux opérationnels

L'activation injustifiée de la chaudière électrique a augmenté de 63% la puissance maximale appelée par le système pendant l'hiver.



Tarif M : facturation de la puissance (16,139\$/kW)

*Leçon 9 : Une **définition et une implémentation adéquates des séquences de contrôle** ainsi qu'une **mise en service continue** sont essentielles à la concrétisation des économies d'énergie et financières.*

Enjeux opérationnels

- Pas de pertes de charges anormales à l'échangeur de chaleur à plaques et aux puits à l'été 2023.
- Sondes de pression dans les puits corrodées à remplacer.
- Les têtes de puits devraient être situées sur des points hauts topographiques pour éviter l'infiltration d'eau.
- Des valves de contre-pression devraient être installées sur les conduites de réinjection sous le niveau de la nappe et l'échangeur à plaque devrait être installé au niveau des puits pour faciliter le maintien d'une pression positive.



Synthèse des leçons apprises

- Importance du puits test et des essais de terrain
- Modèle de simulation avancés pour l'interprétation des ERT et le dimensionnement
- Importance du profil des charges du bâtiment
- Diminution de la longueur totale de forage (73%), de la durée des travaux de forage (60%) et des coûts de construction (19-47%) par rapport à un système en boucle fermée
- Réduction de l'appel de puissance de 70% par rapport à une résistance électrique
- Énergie de pompage à ne pas négliger
- Séquences de contrôle et mise en service critiques pour concrétiser les économies d'énergie et financières.

Les résultats confirment l'efficacité des PCP dans le contexte étudié. Les éléments suivants doivent toutefois être tenus en compte :

- Le projet est situé dans un contexte hydrogéologique particulièrement favorable.
- D'autres projets sont en cours pour étudier les PCP de 500 m dans des contextes hydrogéologiques moins favorables.
- Le suivi de la qualité de l'eau est en cours.
- Les résultats présentés ne considèrent que la thermopompe eau-eau et non le bilan énergétique global du projet de rénovation.



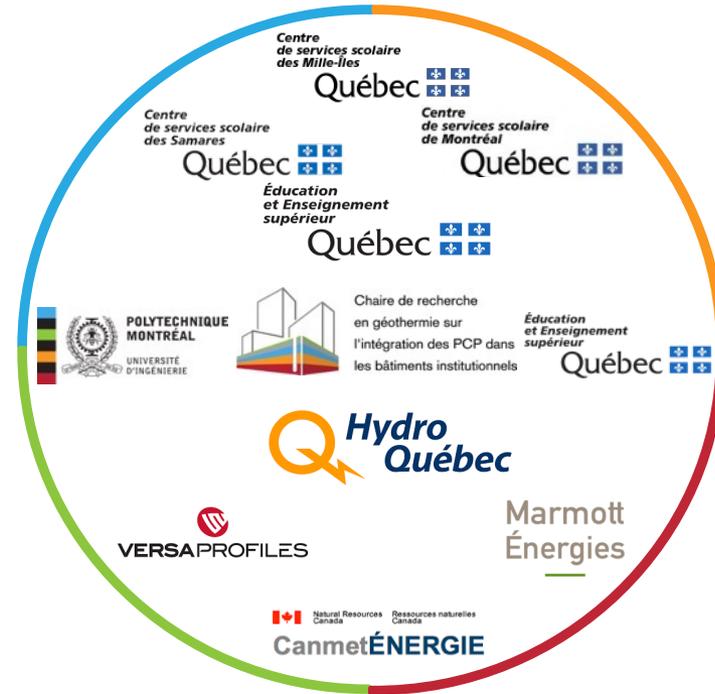
Questions ?



Chaire de recherche
en géothermie sur
l'intégration des PCP dans
les bâtiments institutionnels

Questions:

www.polymtl.ca/geothermie



À venir avec le Réseau Énergie et Bâtiments :

Le 9 novembre, en présentiel à l'Expo Contech, Conférence de Mme Véronique Delisle sur **l'intégration du photovoltaïque aux bâtiments.**

Le 29 Novembre, le symposium annuel d'une journée à l'ETS. **Les pompes à chaleur, des accélérateurs de décarbonation**

