

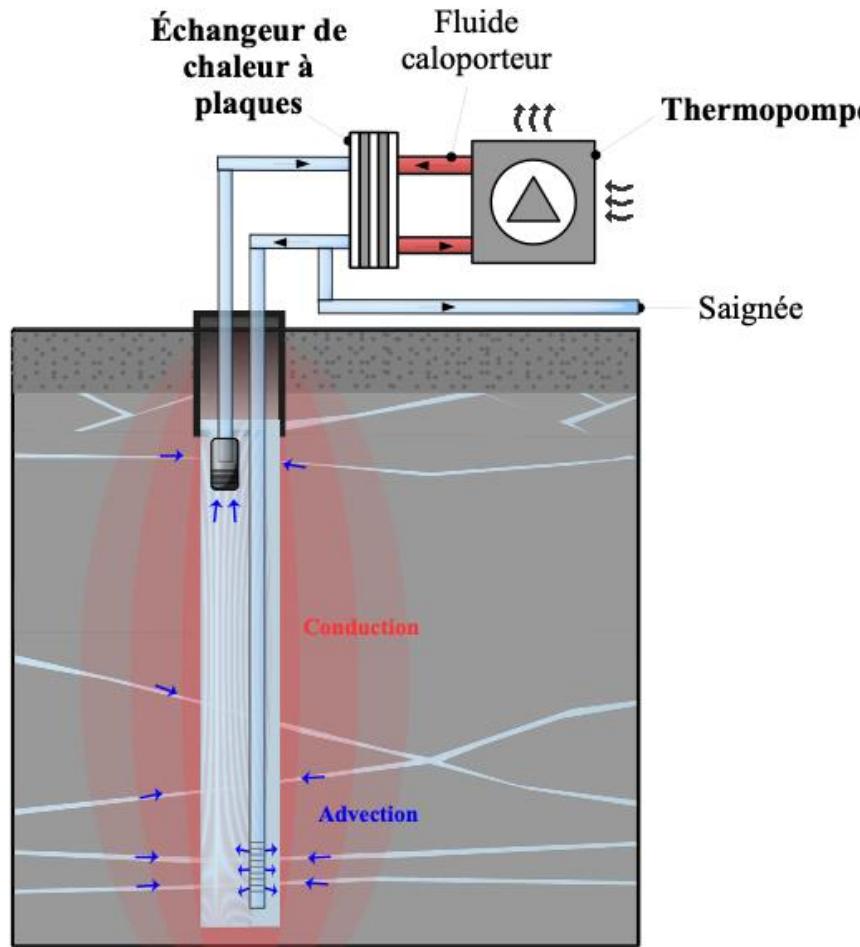


# Les puits à colonne permanente : Une technologie de rupture en géothermie de basse température

Philippe Pasquier, ing. Ph. D.

Titulaire de la Chaire de recherche en géothermie sur l'intégration des PCP dans les bâtiments institutionnels de Polytechnique Montréal.

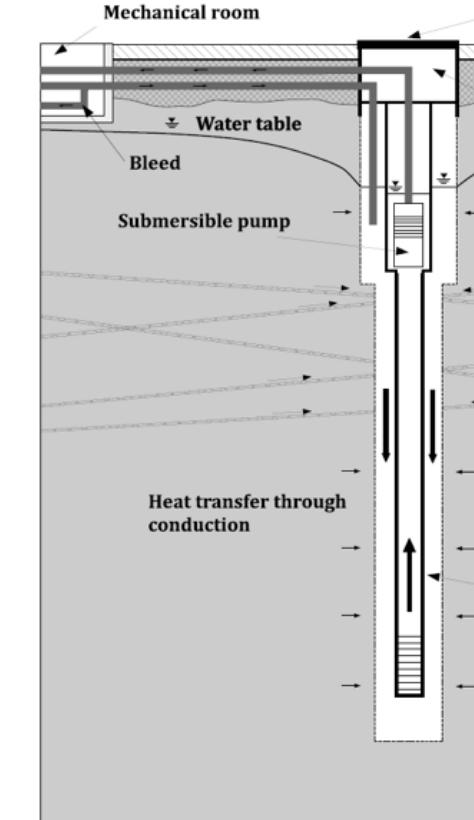
Les puits à colonne permanente (PCP) sont apparus aux États-Unis à la fin des années 1980.



- Un PCP est un puits profond (jusqu'à 750 mètres).
- L'eau est pompée au sommet du puits et réinjectée à la base (ou l'inverse).
- Le temps de résidence est long (30-60 min) et la capacité thermique du puits élevée (6 à 12 m<sup>3</sup> d'eau).
- En pointe, la *saignée* favorise un apport d'eau souterraine dans le PCP.
- L'eau doit être retournée à l'aquifère d'origine, généralement via un puits d'injection.
- L'efficacité thermique est environ 3 × celle d'un puits en boucle fermée.
- Les coûts de construction sont 2 à 5 × moindres que ceux d'un système en boucle fermée.



Le réel potentiel des PCP réside dans leur capacité à être intégrés aux bâtiments déjà construits dans les zones urbaines denses où l'installation de puits en boucle fermée est impossible.



Un système bien conçu ne laisse apparaître qu'une boîte de service sur les lieux publics.

# Potentiel des PCP en zones urbaines

4/25

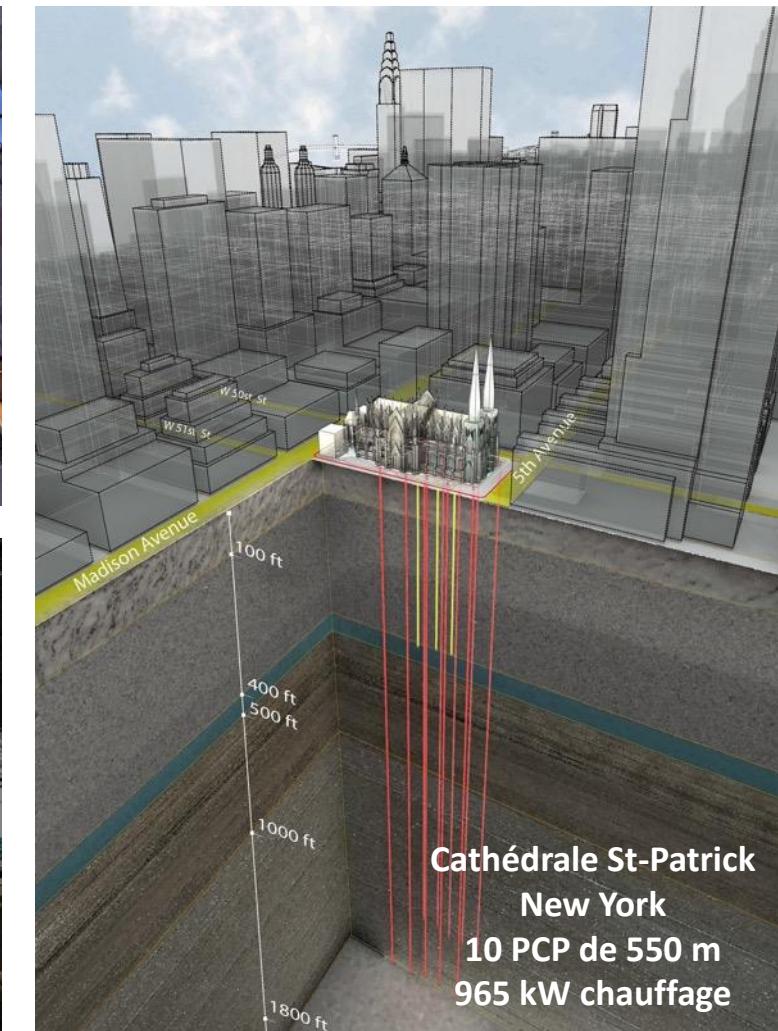
Le réel potentiel des PCP réside dans leur capacité à être intégrés aux bâtiments déjà construits dans les zones urbaines denses.

Efficacité thermique :  $3 \times \nearrow$

Profondeur des PCP :  $3 \frac{1}{3} \times \nearrow$

Nombre de puits\* :  $10 \times \searrow$

\*PCP de 500 m par rapport à des sondes verticales de 150 m :



- 30 000 PCP seraient construits aux États-Unis.
- Les PCP représentent 29% des installations géothermiques en Corée du Sud.
- Des mesures effectuées sur des systèmes aux États-Unis au début des années 2000 ont montré que:
  - Six PCP de 455 m avaient généré des économies d'énergie de 686 820 kWh/an pendant neuf ans: **700 kW et 115 kW/puits !**
  - Des économies similaires pour un système de 16 PCP et 326 thermopompes: **2150 kW et 133 kW/puits !**

Un potentiel important, mais un déploiement géographique relativement limité

Utilisé localement ?

Freins humains et organisationnels

Où visiter une installation ?

conception

??

\$\$\$\$

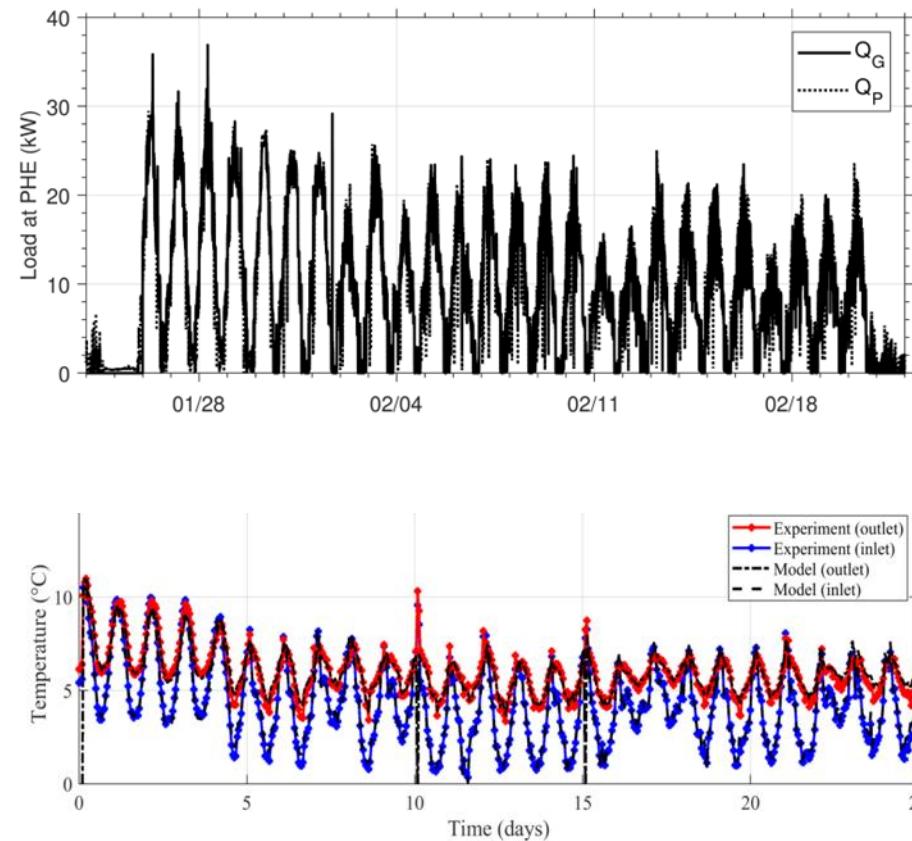
??

opération

construction

Innocuité environnementale ?

Absence de personnel qualifié

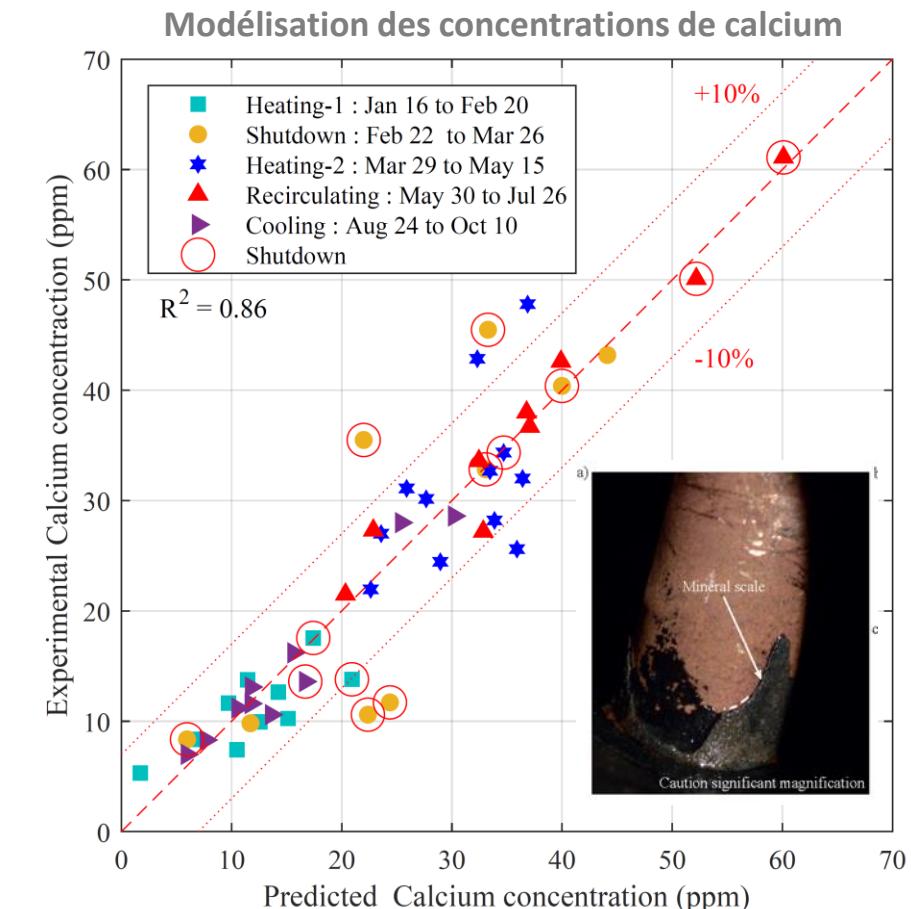


Nous opérons un PCP depuis 2016:

- Aucun problème associé au gel ou au colmatage de l'échangeur.
- Une petite saignée a permis de maintenir l'opération des PàC.
- Les charges couvertes par le PCP (215 m) étaient de 30 kW (45 kW au bâtiment) à un COP moyen de 3.
- La puissance (160 W/m) est 2 à 3 fois plus élevée qu'un puits conventionnel.
- Des problèmes de contrôle n'ont pas permis d'obtenir des COP optimums.

L'eau souterraine a été échantillonnée et un **traitement de l'eau** a été testé dans différentes conditions d'opération.

- Arrêt du pompage = stagnation de l'eau et précipitation de carbonates
- Traitement de l'eau = réduction du calcium dissous
- Aucun problème majeur de colmatage observé depuis 2018



**La Chaire de géothermie est active depuis 2020 et vise à lever rapidement les barrières à l'utilisation des PCP**

**1 – Réduire l'appel de puissance en pointe et opérer efficacement des PCP**

**2 – Acquérir, concevoir, valider et démontrer le potentiel des PCP**

**3 projets de démonstration**



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

**24 projets de recherche  
35 étudiants**

**3 – Suivre la qualité des eaux souterraines et illustrer l'innocuité des PCP**

**4 – Former, changer les perceptions, diffuser et transférer des connaissances**

# Chaire de géothermie sur les PCP - Structure

9/25

- Activités de 2020 à 2025
- 3 Projets de démonstration
- 8 Partenaires
- 11 Chercheurs
- 24 Projets de recherche
- 34 Étudiants

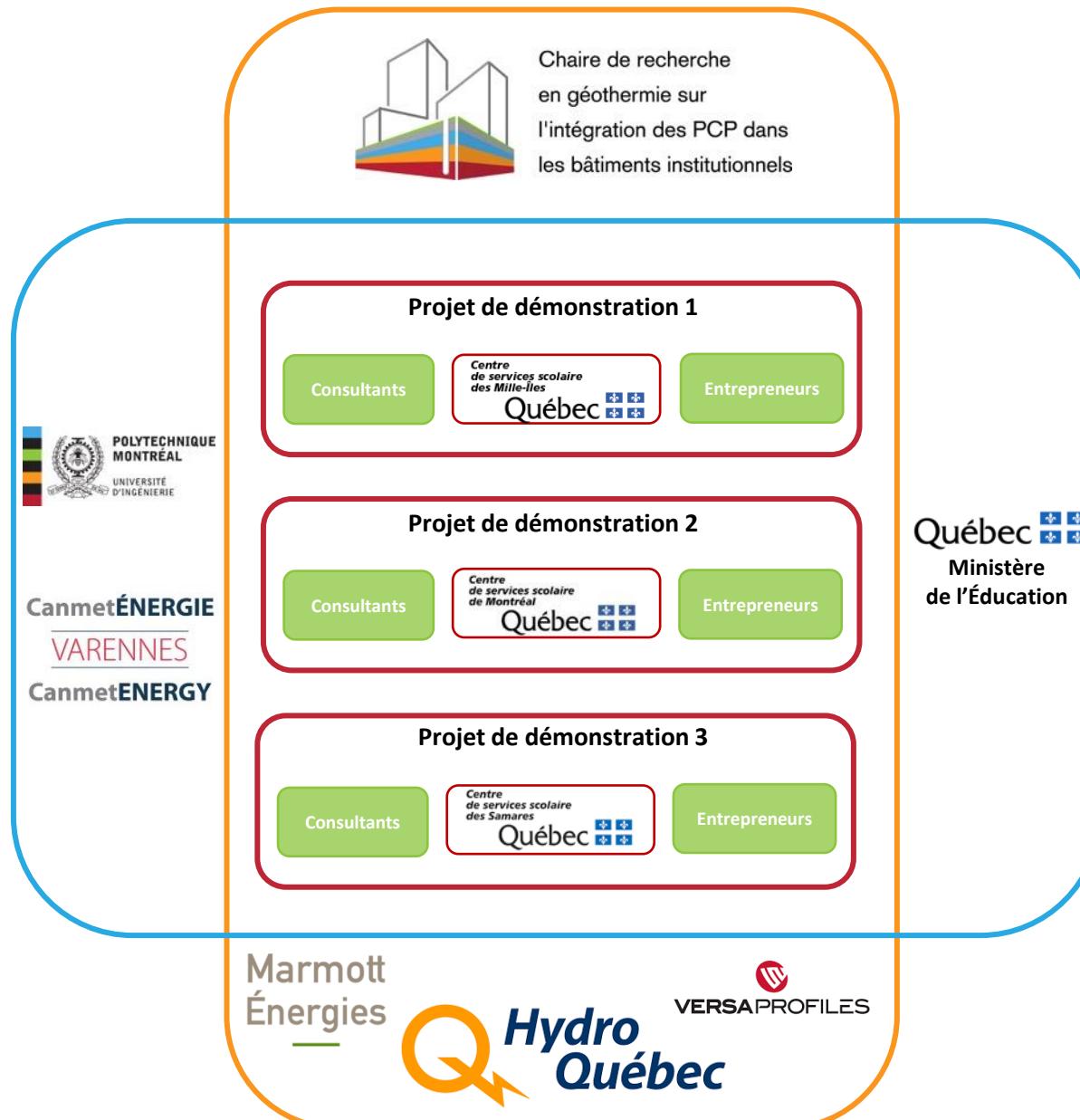
- Budget de recherche : 2.6 M\$
- Coûts de construction : 2.0 M\$
- Durée : 6 ans

Activités de formation annuelles

- 1-2 séminaires de formation
- 1 colloque scientifique
- Réunions de conception
- Matériel en ligne

[www.polymtl.ca/geothermie](http://www.polymtl.ca/geothermie)

- Nombreuses sollicitations ind.
- Participation à des comités CSA
- Collaborations internationales



J. C.-Ibarra  
Mécanique du bâtiment

B. Courcelles  
Traitement de l'eau

G. F-Ouellet  
Géophysique

F. Gervais  
Géologie structurale

F. Guibault  
Modélisation numérique

E. Hassanzadeh  
Perception du risque

M. Kummert  
Mécanique du bâtiment

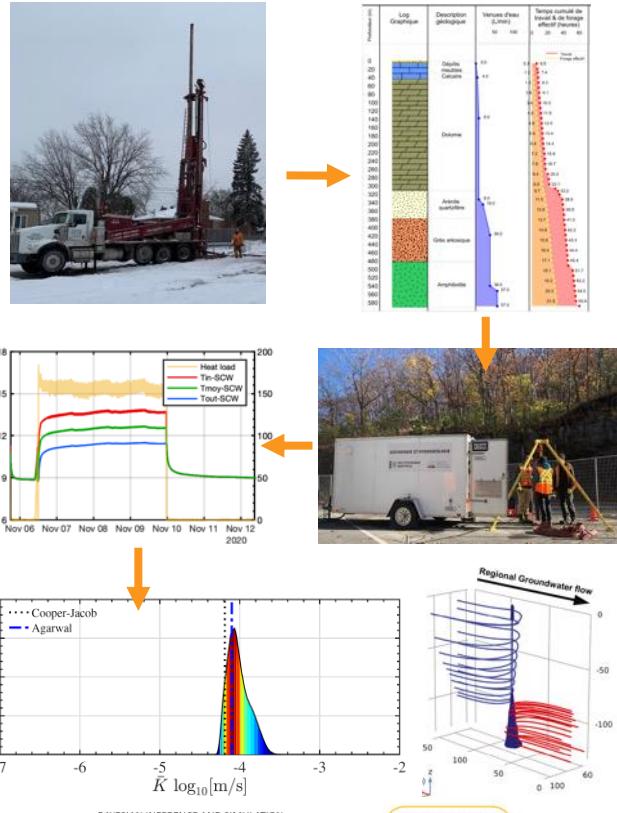
D. Millette  
Hydrogéologie

L. Millette  
Perception du risque

A. Nguyen  
Géothermie

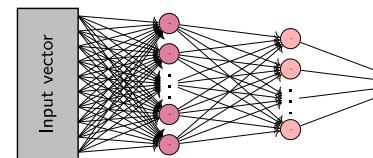
P. Pasquier - Titulaire  
Géothermie

## 1-Acquisition des propriétés

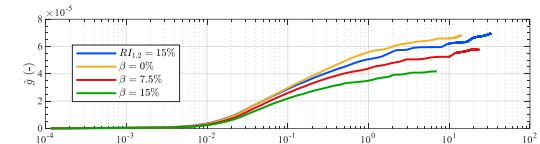
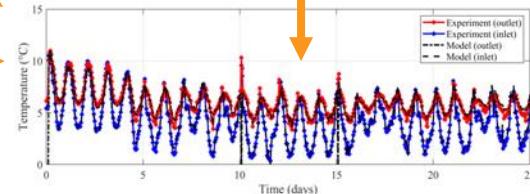


## 2-Simulation et conception

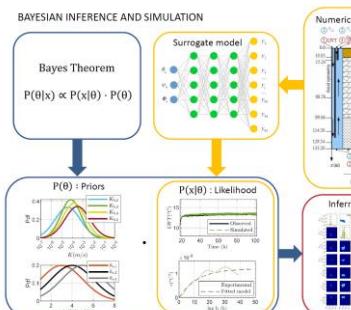
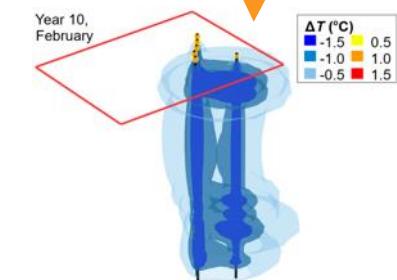
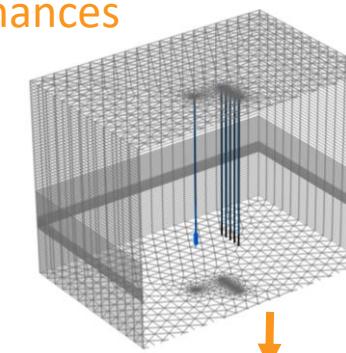
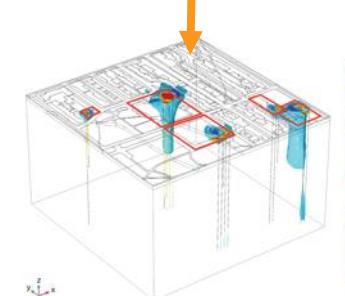
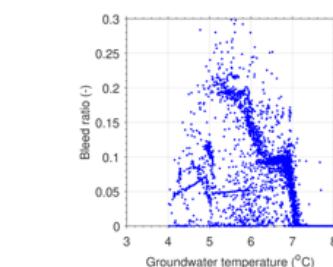
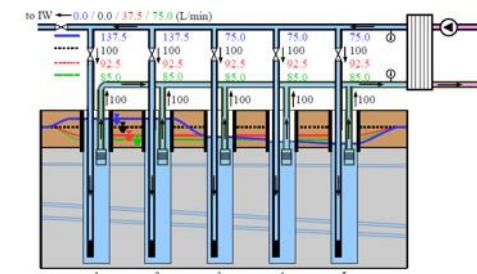
$$\begin{bmatrix} a_{11}P_4 + H_4 & a_{12}P_4 & a_{22}P_4 + H_4 & a_{23}P_4 & a_{33}P_4 + H_4 \\ a_{21}P_4 & a_{11}P_4 & a_{22}P_4 + H_4 & a_{32}P_4 & a_{31}P_4 + H_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1^T \\ C_2^T \\ C_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_1(0)E^T \\ y'_2(0)E^T \\ y'_3(0)E^T \end{bmatrix}$$



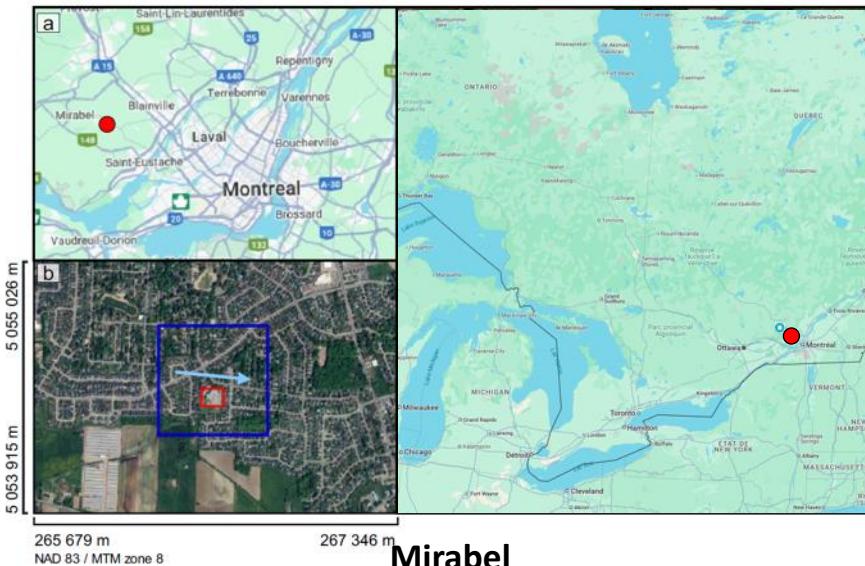
$$y(t) = \sum_{j=1}^m \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\mathbf{f}_j) \cdot \mathcal{F}(\mathbf{g}_j))$$



## 3-Analyse, suivi et optimisation des performances



- **Site de démonstration 1 – CSS des Mille-Îles – Mirabel:** En fonctionnement depuis 2022. Suivi et amélioration des performances, échantillonnage de l'eau souterraine chaque trimestre.
- **Site de démonstration 2 – CSS de Montréal – Tétreaultville:** Construction de l'école en ce moment.
- **Site de démonstration 3 – CSS des Samares – Joliette:** Forage exploratoire et essais de terrain complétés. Conception et production des plans & devis terminés. Construction prévue à l'automne 2025.



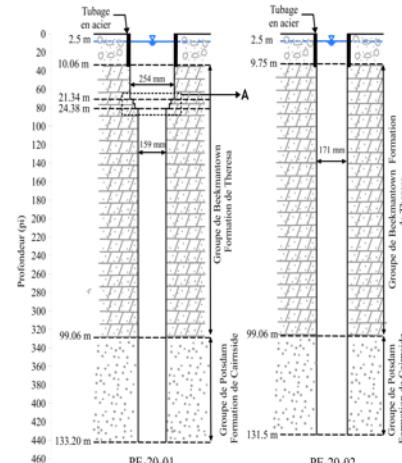
Montréal



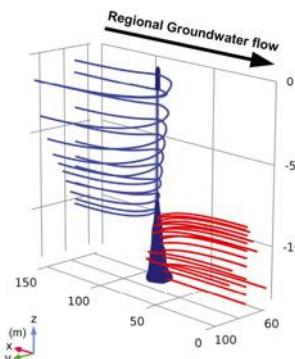
Joliette



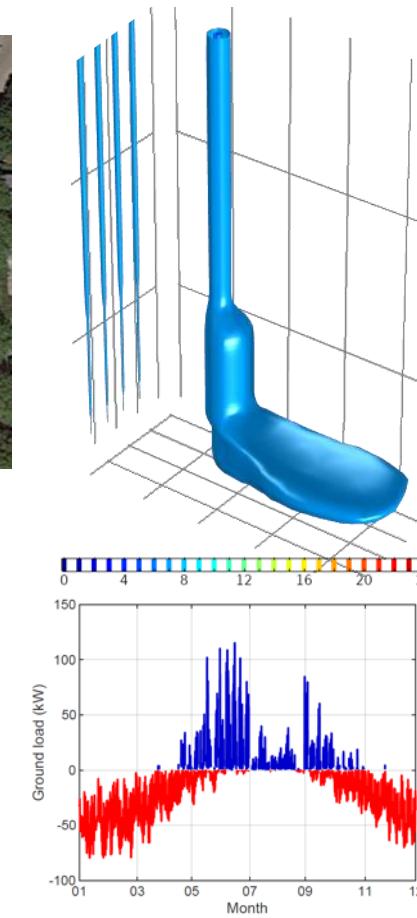
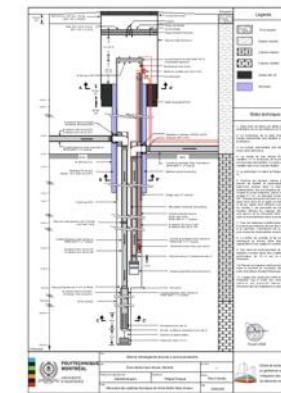
## 1- Phase exploratoire



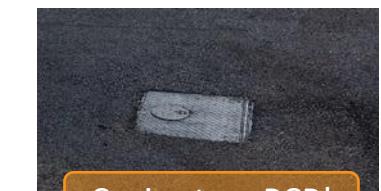
- Forages exploratoires
- Essais de réponse thermique
- Essais de pompage
- Analyses de l'eau



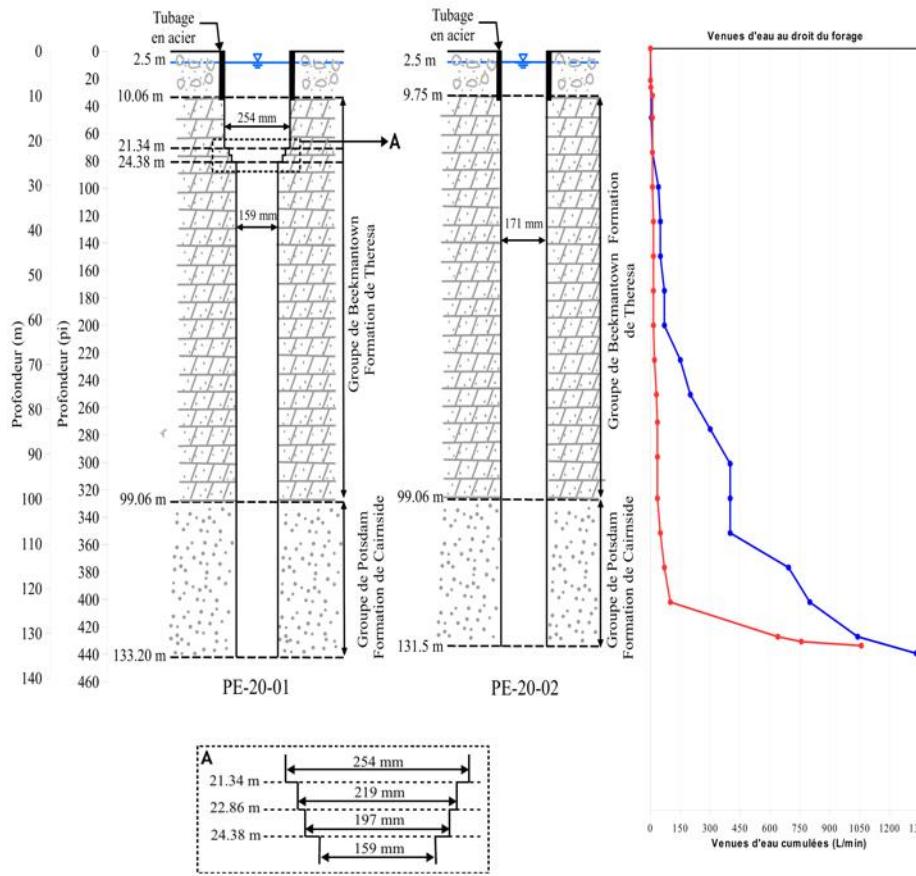
## 2- Simulation et conception



## 3-Construction



Ceci est un PCP!



### Paramètres favorables aux PCP:

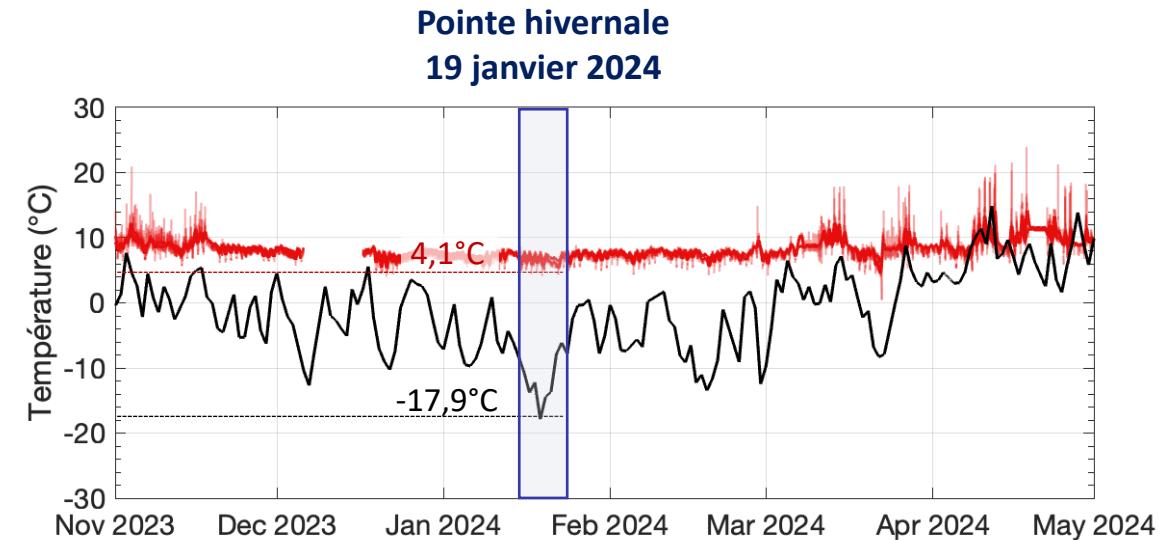
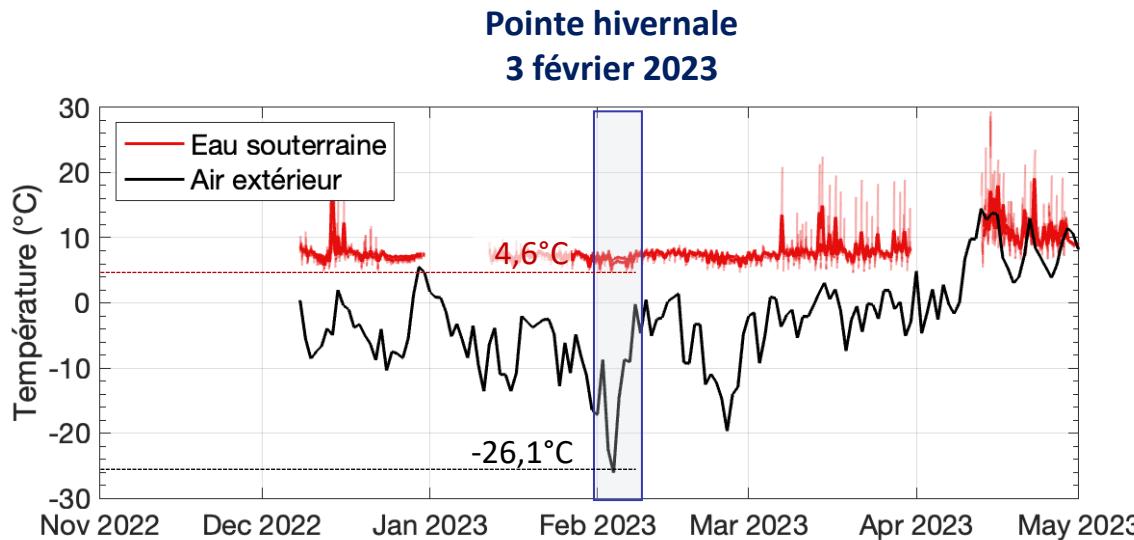
- ✓ Socle rocheux peu profond
- ✓ Nappe phréatique peu profonde
- ✓ Eau souterraine peu réactive
- ✓ Conductivité thermique élevée
- ✓ Perméabilité moyenne à élevée
- ✓ Fractures à la base du PCP
- ✓ Risque de biocolmatage faible

- Coûts de construction : 2 × moins
- Période de construction : 60 % plus courte
- Nombre de puits : 4 à 5 × moins de puits



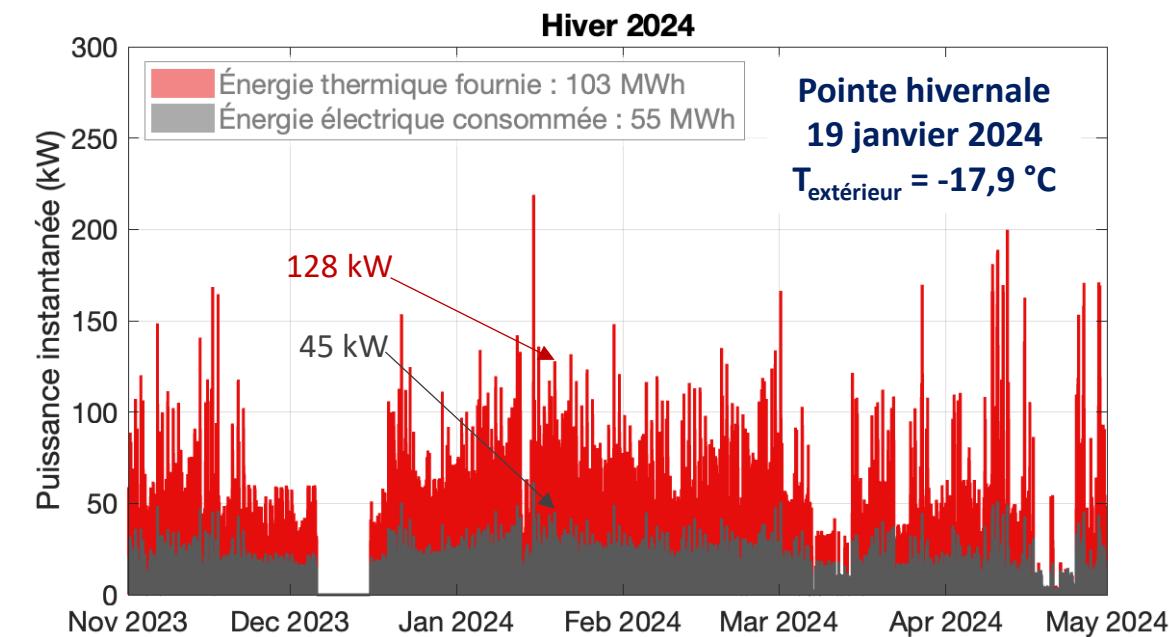
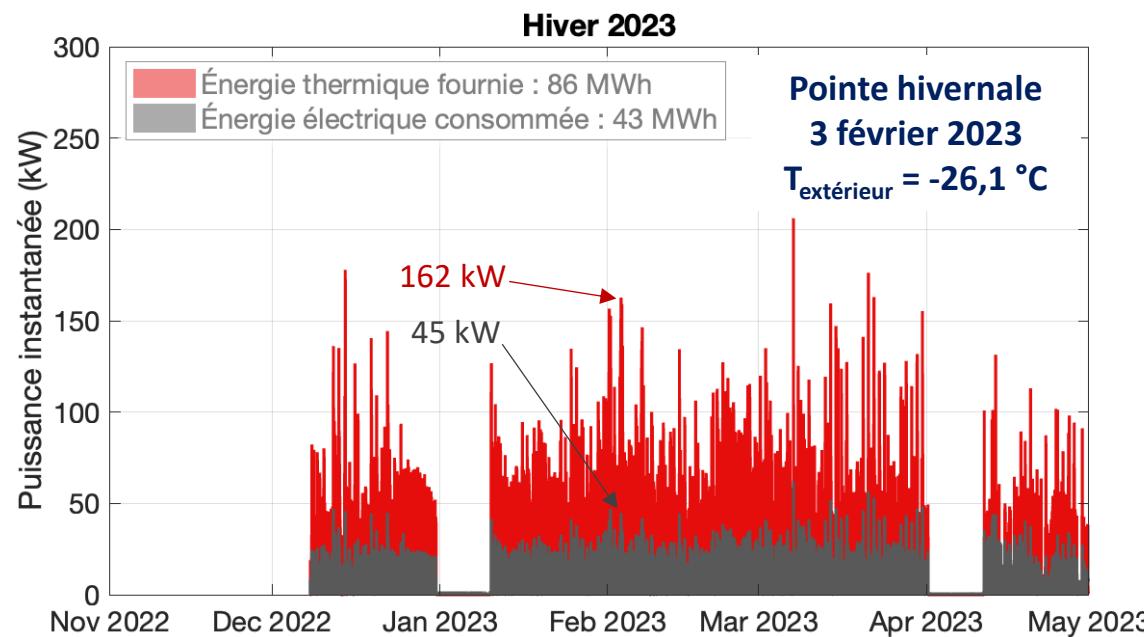
Ceci est un PCP!





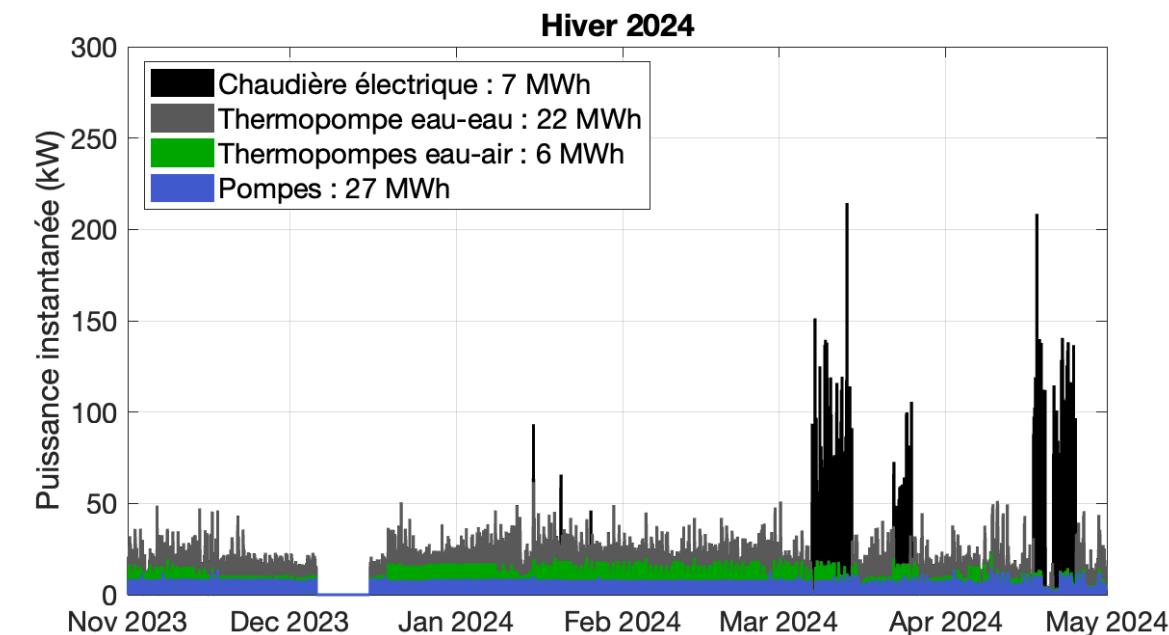
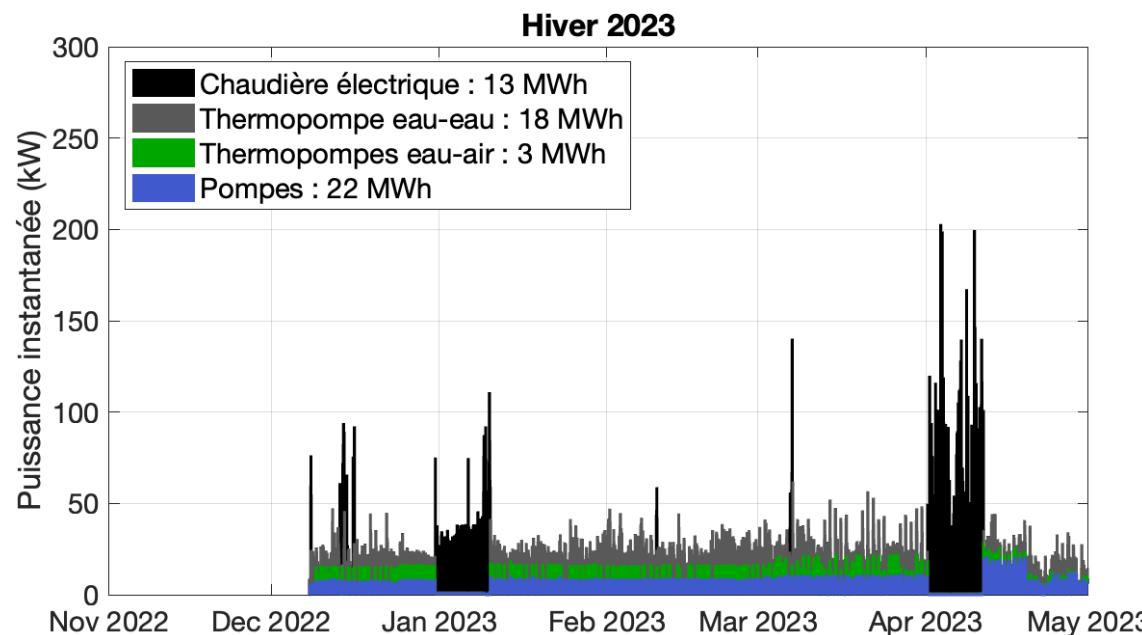
- Température de l'eau souterraine particulièrement stable
- Températures comprises entre 4 et 24 °C

## Réduction de plus de 3x de l'appel de puissance électrique lors des pointes hivernales



### Problèmes de contrôle

- Activation « injustifiée » de la chaudière électrique
- Séquences de contrôle inadaptées ?



- Activation « injustifiée » de la chaudière électrique = appel de puissance ↑
- Pompage (40% de l'énergie totale consommée) = économies d'énergie ↓
- Améliorations du réseau hydraulique ?

## Suivi trimestriel de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau souterraine



### Analyse microbiologique

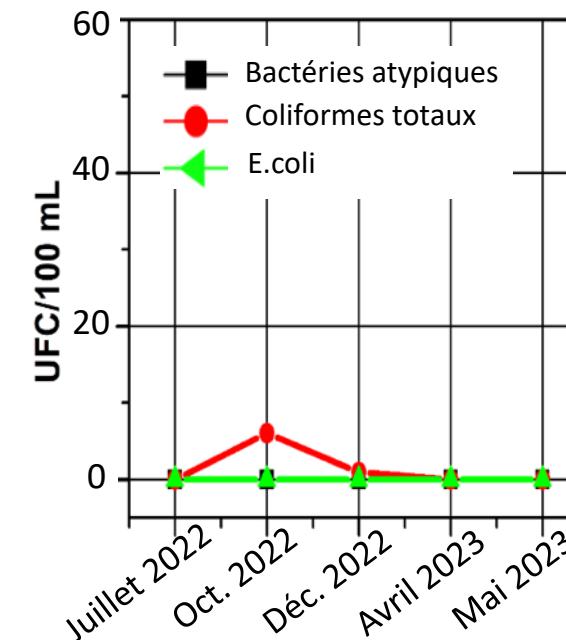


- Coliformes totaux
- E.coli
- Bactéries du fer
- Bactéries SR
- Richesse microbienne

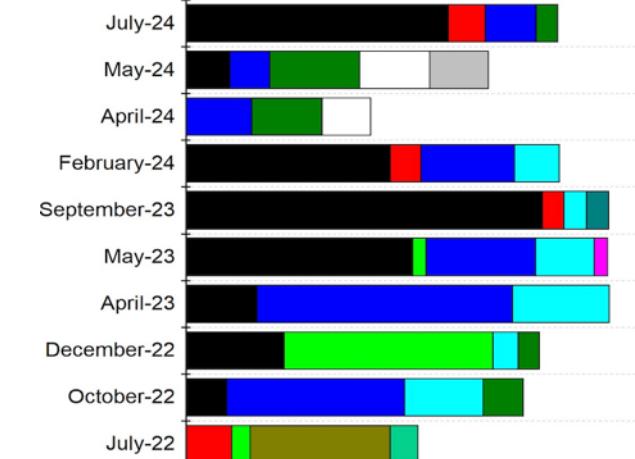
### Analyse chimique



- Al, Cu, Fe, Mn, Ph, Si
- Fer total
- Fer ferreux
- COD
- Solides totaux dissous



### Diversité microbienne (%)



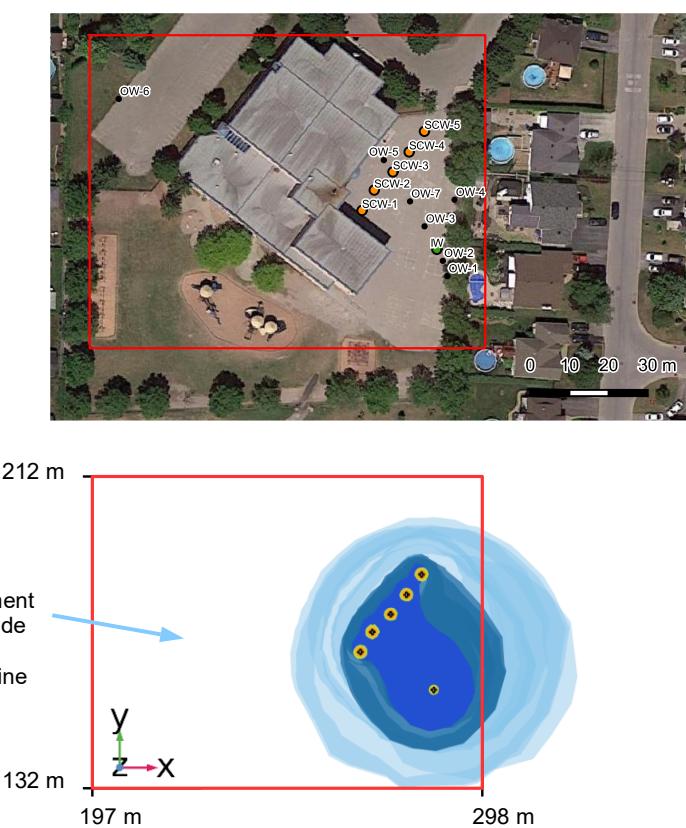
Burkholderiaceae	Woesearchaeia	Rhodocyclaceae	Pseudomonadaceae
Comamonadaceae	Desulfovulbaceae	uncultured bacterium	Nassophorea
Gallionellaceae	Rhodobacteraceae	Hymenobacteraceae	Sphingomonadaceae
D_5_Chromulinales	Acetobacteraceae	Erysipeltotrichaceae	Piscirickettsiaceae
Prolibacteraceae	Aerolineaceae	Thiotrichomicrob	Acidovorax
Spirochaetaceae	Eubacteriaceae	Geobacteraceae	Rhizobiaceae
Diapherotrites archaeon	Tenderiaceae	Bacteroides	Parcubacteria
uncultured euryarchaeote	Desulfovibacteraceae	Thiotrichomicrob	Methylomonaceae
Bacteroides	Betaproteobacteri	uncultured archaeon	Thiovulaceae
Desulfovibrionaceae	Ochromonadales	uncultured archaeon	Unclassified

Peu d'impacts des PCP sur la qualité de l'eau souterraine observés à ce jour

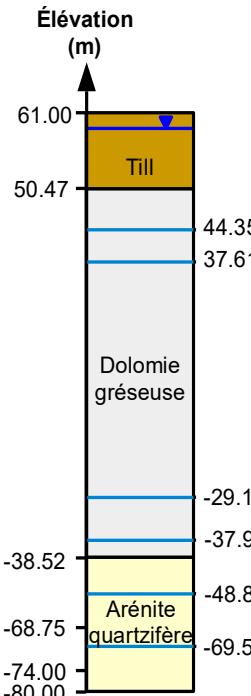
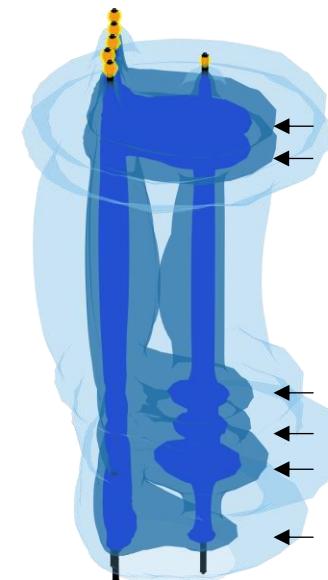
Source : Ouferroukh et al. (2024). Impact of a standing column well on the geochemical and microbiological quality of groundwater.

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

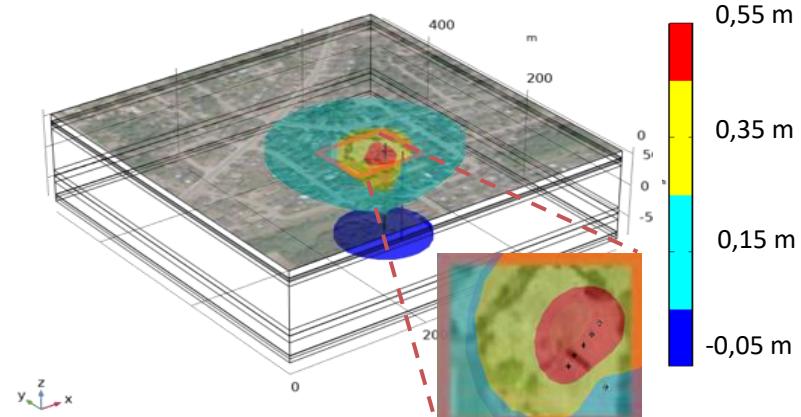




Panache thermique



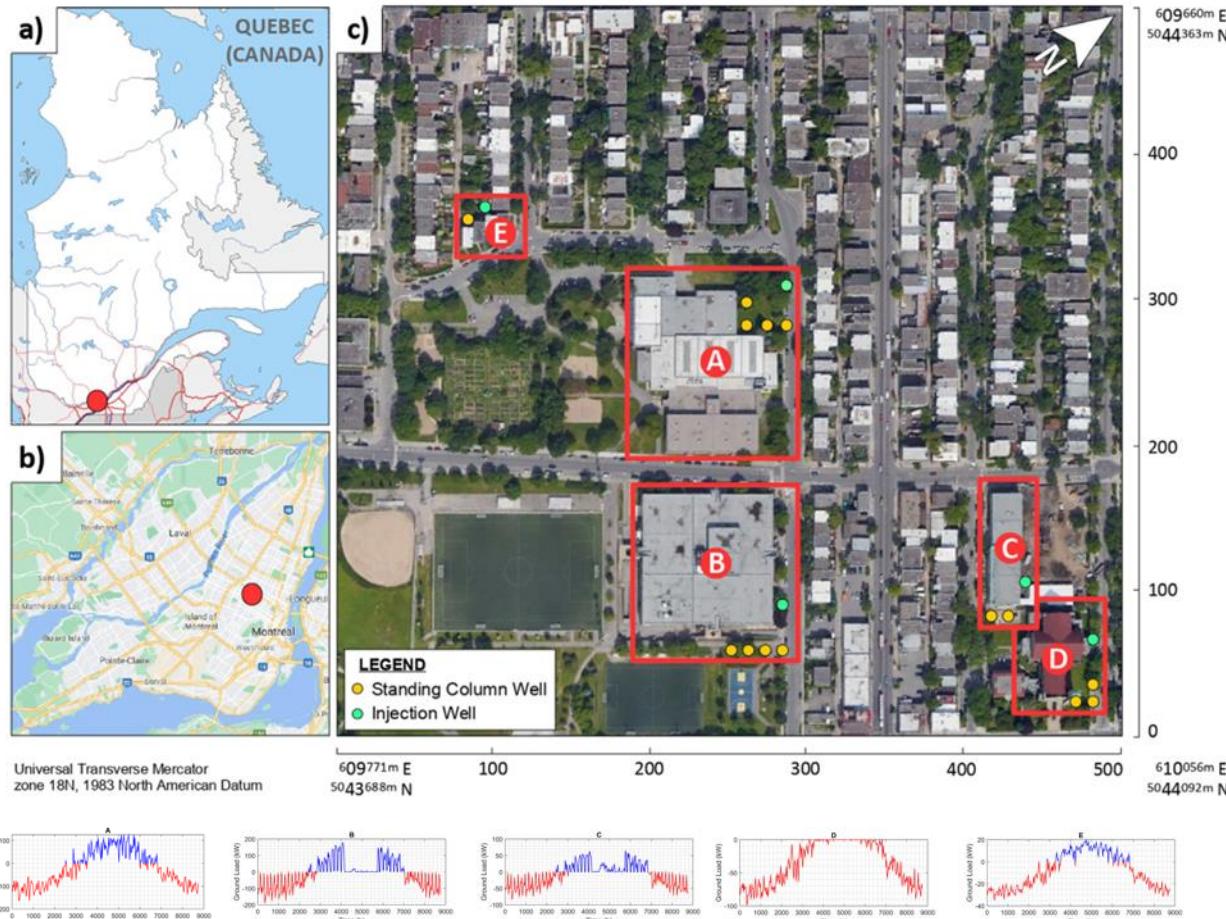
Rabattement hydraulique



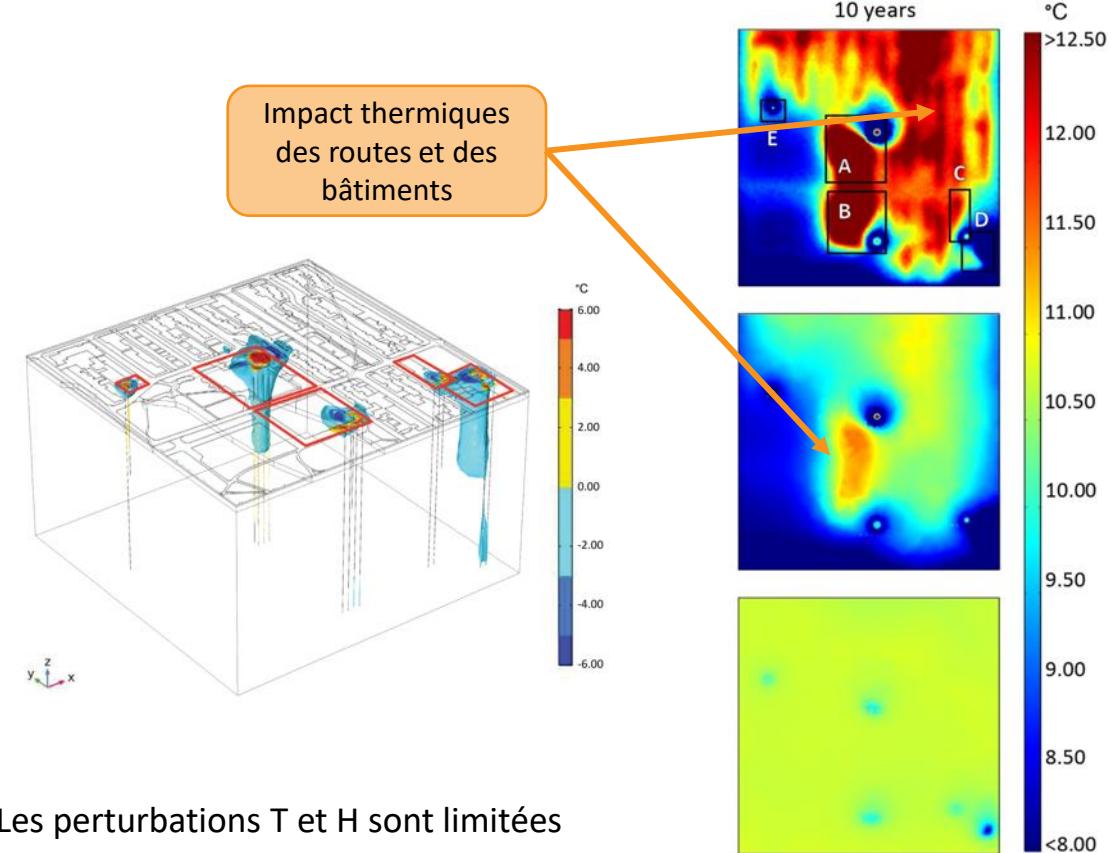
**De faibles impacts sur la piézométrie et la température sont mesurés.  
Peu d'impacts appréhendés numériquement.**

Sources : Champagne-Péladeau et Pasquier (2024). Delineation of the thermal plume associated with a standing column well system.

Cinq bâtiments institutionnels intégrés dans un modèle de 500 m x 500 m

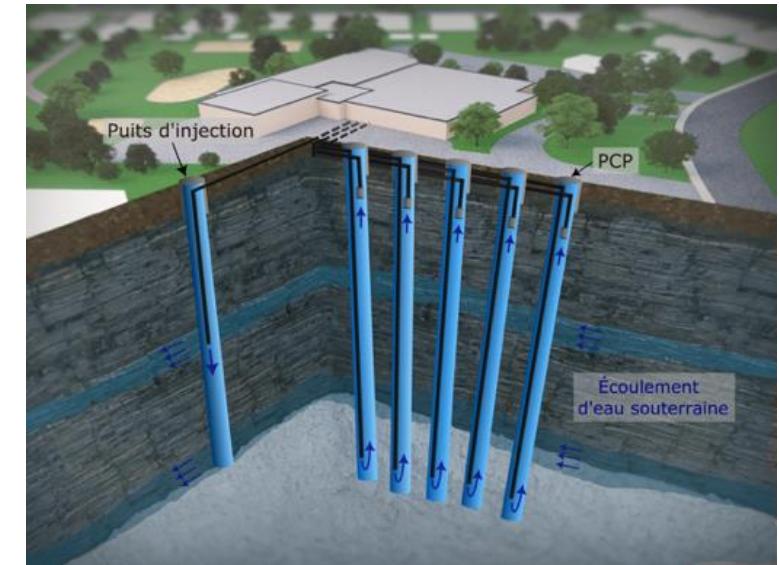


Impact thermiques des routes et des bâtiments



- Les perturbations T et H sont limitées
- Interférence entre les systèmes est faible
- Les infrastructures ont un impact plus important que les PCP

- ✓ Méthodologie de conception apparaît adéquate
- ✓ Diminution des coûts de construction → 2x
- ✓ Diminution de la consommation énergétique → 2x
- ✓ Réduction de l'appel de puissance électrique en pointe → 3x
- ✓ Peu d'entretien et d'impacts environnementaux à ce jour



- ? Allègement des essais de terrain et du processus de dimensionnement
- ? Amélioration du design et de l'opération du réseau d'eau
- ? Séquences de contrôle critiques pour concrétiser les économies
- ? Démonstration scientifique à long terme de l'innocuité environnementale

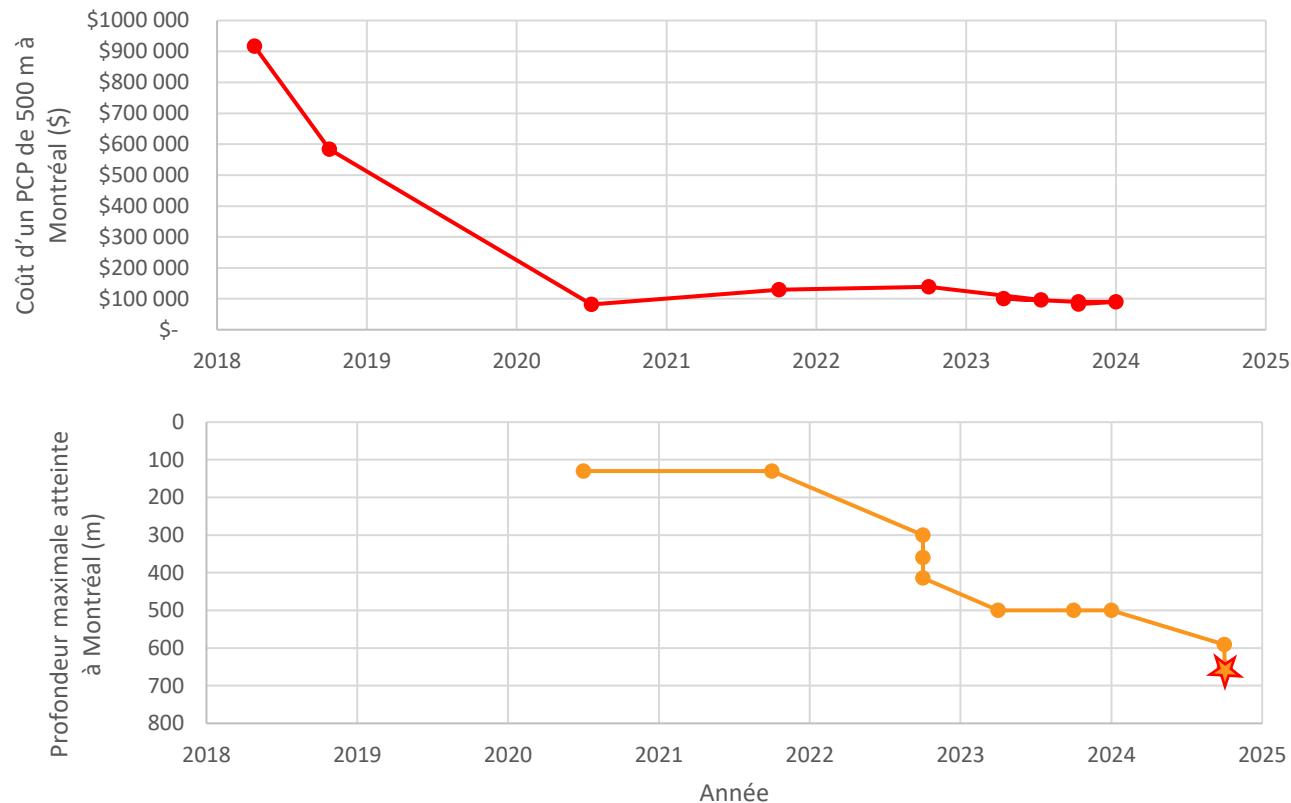


- Premier prix dans la catégorie énergie pour:
  - Association des firmes de génie-conseil du Canada
  - Association des ingénieurs-conseils du Québec
- Prix le Breton pour l'intendance environnementale
  - Association des firmes de génie-conseil du Canada
- Finaliste Honoris Genius OIQ - Innovation technologique
  - Ordre des ingénieurs du Québec



## Les activités de recherche de la Chaire ont mené à plusieurs projets industriels

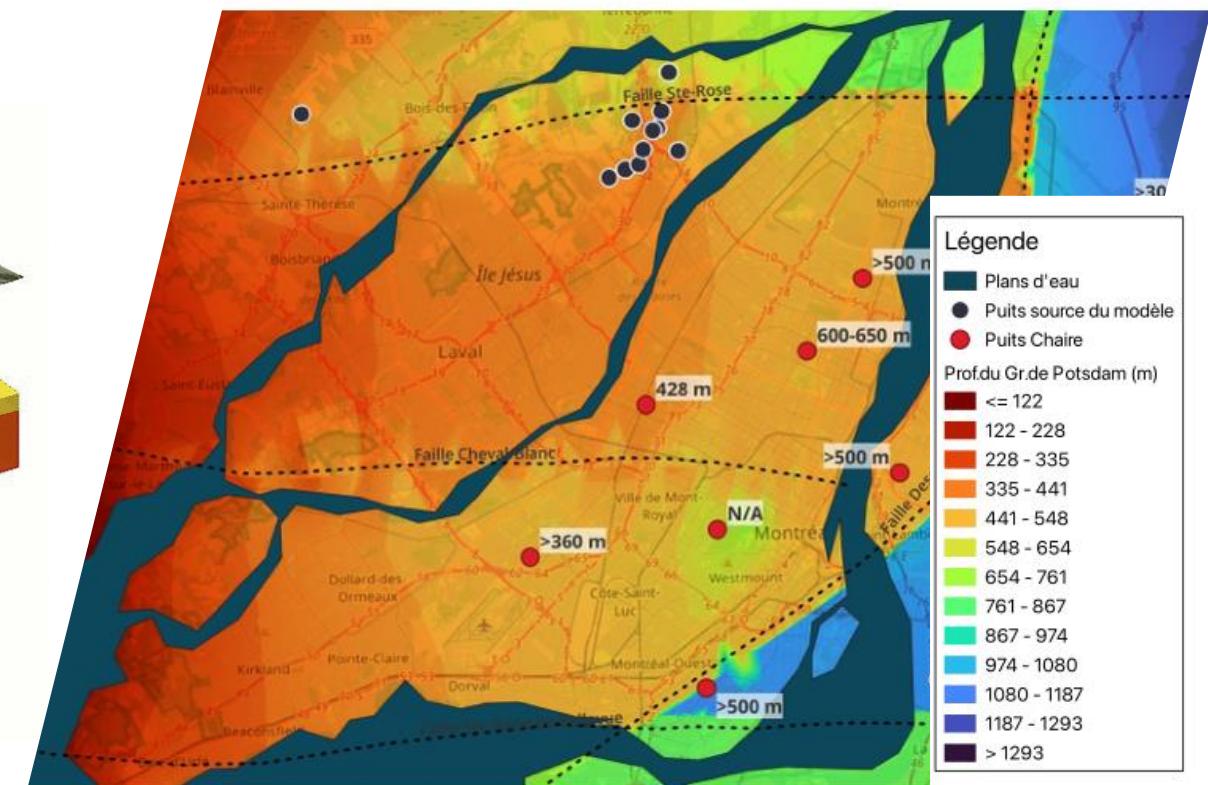
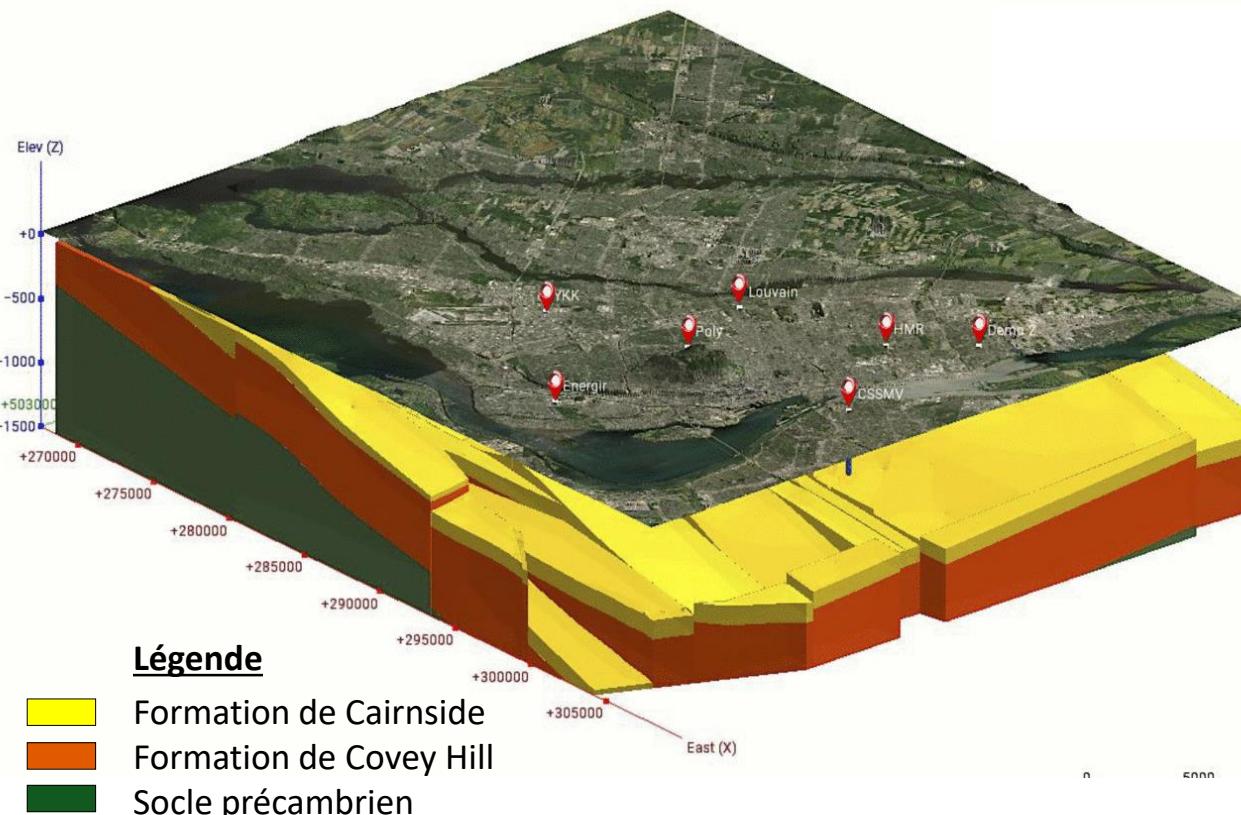
- Un meilleur partage des risques a abaissé les coûts
- La profondeur maximale atteinte augmente constamment



# Projets industriels dans la région de Montréal

23/25

- La Formation de Cairnside est un grès compétent et perméable, propice aux PCP
- Sa profondeur est estimée à 750 m au centre-ville de Montréal
- Aucun forage profond n'a été réalisé au centre-ville



## Forage exploratoire

(5-7 jours)



## Mesure du profil initial de température

(1 jour)

## Repos du sol

(3-7 jours)

## Repos du sol

(>7 jours)



## Échantillonnage de l'eau souterraine

(1 jour)



Temps total =  
environ 30-50 jours



## Essai de réponse thermique

- Circulation continue (1 jour)
- Chauffage (5 jours)
- Saignée (1 jour)
- Restitution (1 jour)

## Essai de pompage

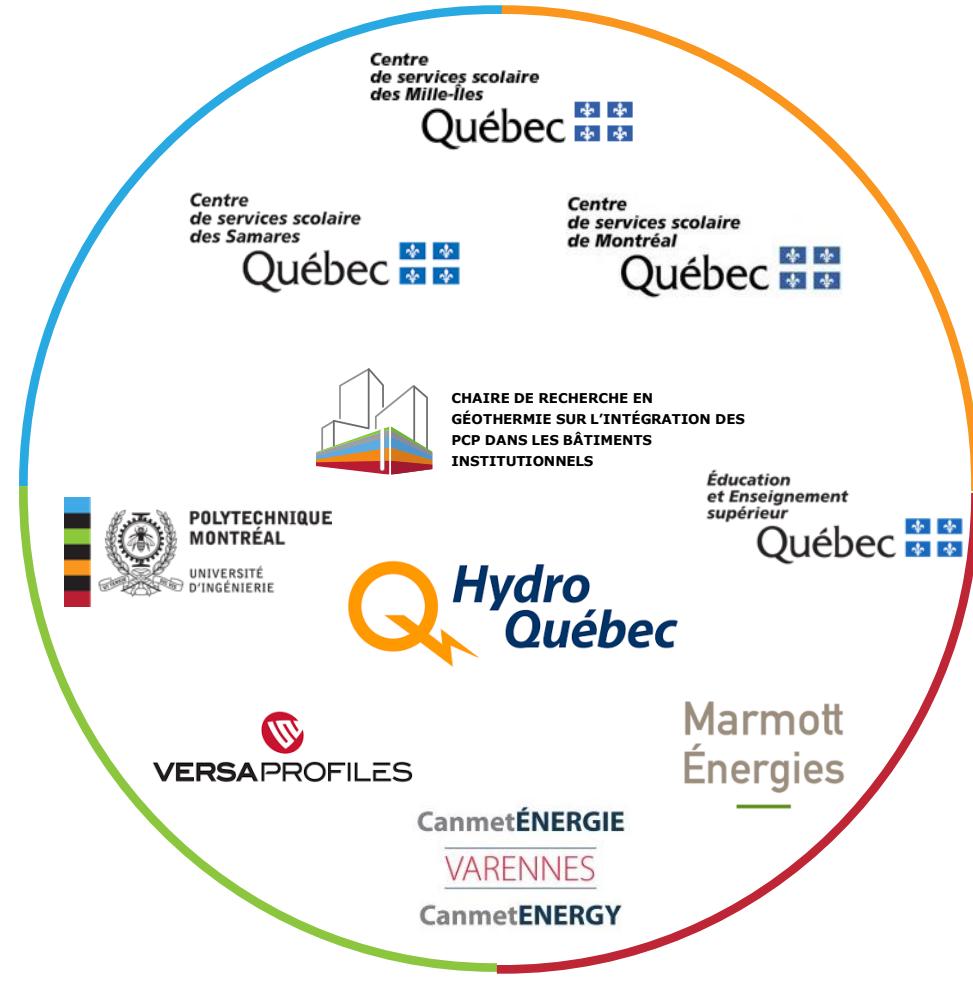
- Pompage (3 jours)
- Remontée (1-5 jours)



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

Questions:

[www.polymtl.ca/geothermie](http://www.polymtl.ca/geothermie)



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

