



## Puits à colonne permanente : Avancements récents et éléments de conception

Présenté par  
Philippe Pasquier ing., Ph.D.

21 octobre 2020



POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL





**Philippe Pasquier, ing., Ph.D.**

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

Département des génies civil, géologique et des mines  
Polytechnique Montréal

[philippe.pasquier@polymtl.ca](mailto:philippe.pasquier@polymtl.ca) | [Chaire de recherche en géothermie](#)



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

**POLYTECHNIQUE  
MONTREAL**

UNIVERSITÉ  
D'INGÉNIERIE



# Objectifs d'apprentissage

1. Se familiariser avec les puits à colonne permanente et comprendre quelles sont les barrières qui ralentissent leur déploiement
2. Découvrir les activités de formation prévues par la chaire de recherche sur les PCP
3. Connaître les avancements scientifiques récents faits au Québec sur les PCP
4. Identifier les causes pouvant mener à un échec et les solutions possibles



# Plan de la présentation

## 1.0 – Potentiel des PCP

- Fonctionnement
- Intégration en milieu urbain
- Barrières au déploiement des PCP

## 2.0 – Chaire de recherche sur les PCP

- Projets de démonstration

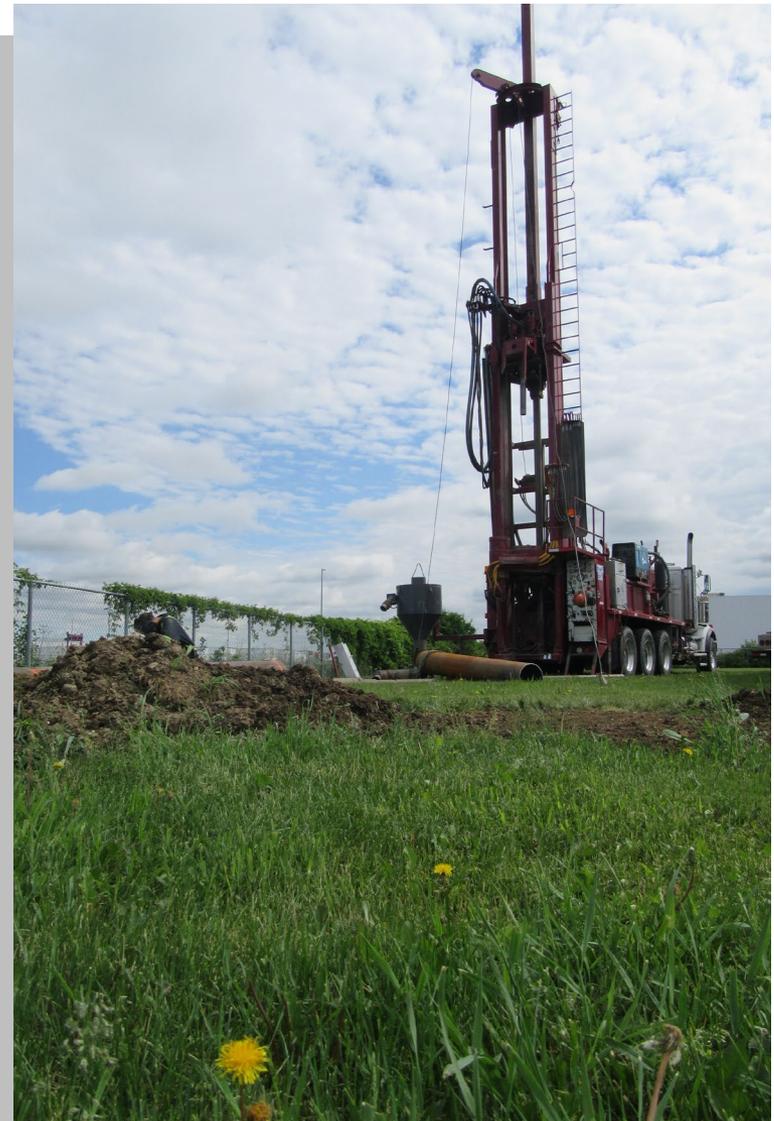
## 3.0 – Avancements récents en recherche

- Démonstration à l'URG
- Simulation de PCP
- Qualité de l'eau
- Contrôle des pompes

## 4.0 – Pour un projet réussi

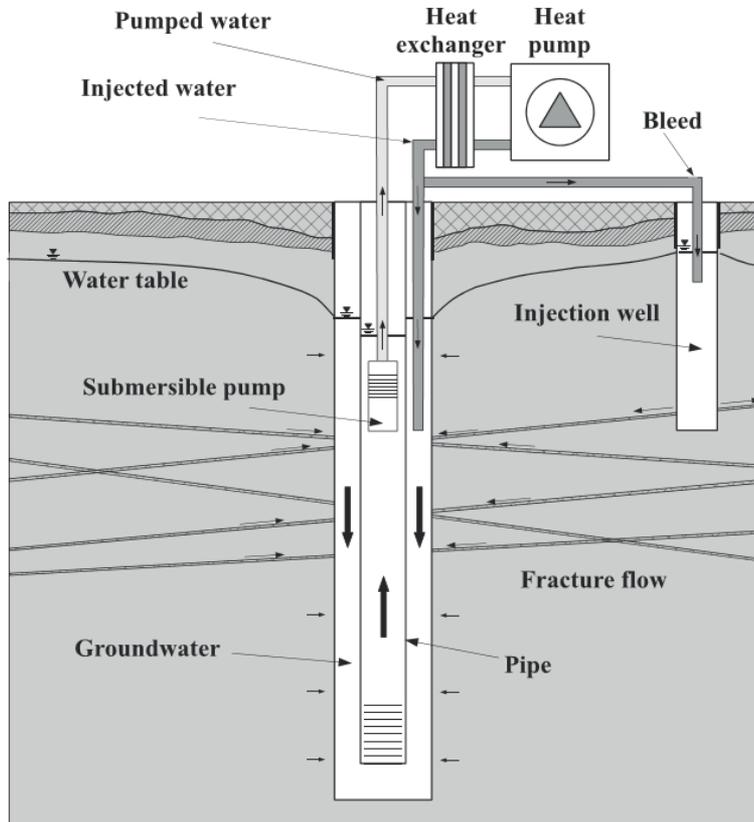
- Forages exploratoires
- Équilibrage des débits
- Échangeur de chaleur
- Aération de l'eau
- Traitement de l'eau
- Contrôle et chauffage auxiliaire
- Entretien préventif

## 5.0 – Conclusions



# 1 - Potentiel des PCP – Fonctionnement

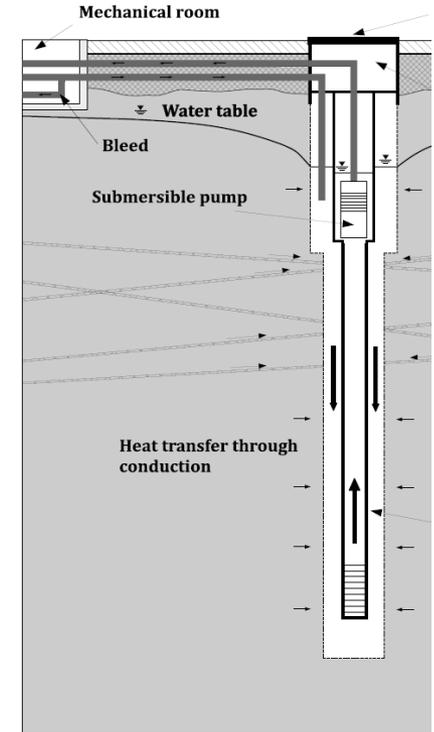
Les puits à colonne permanente (PCP) sont apparus aux États-Unis à la fin des années 1980 sous l'impulsion de Carl Orio.



- Un PCP est un puits de 75 à 500 m de profondeur.
- L'eau est pompée à la base du puits et réinjectée à son sommet (ou vice versa).
- Le temps de résidence est long (30-45 min) et la capacité thermique du puits élevée.
- En pointe, le puits est *saigné*, ce qui favorise un apport d'eau souterraine dans le PCP.
- L'eau pompée doit être retournée à l'aquifère d'origine, une exigence réglementaire.
- L'efficacité thermique d'un PCP est environ trois fois celle d'un puits en boucle fermée.
- Les coûts de construction sont 2 à 5 fois moindres que ceux d'un système en boucle fermée.

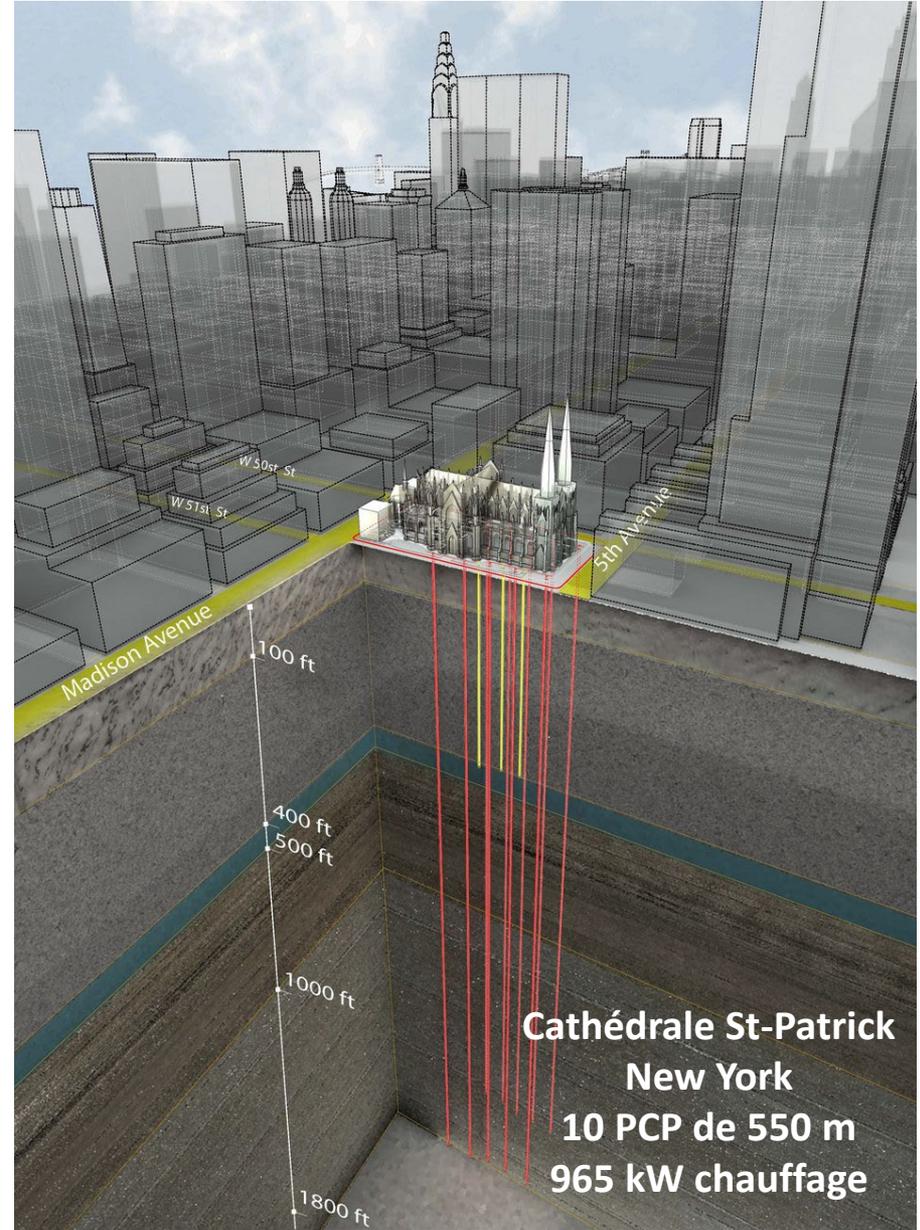
# 1 - Potentiel des PCP – Intégration en milieu urbain

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.



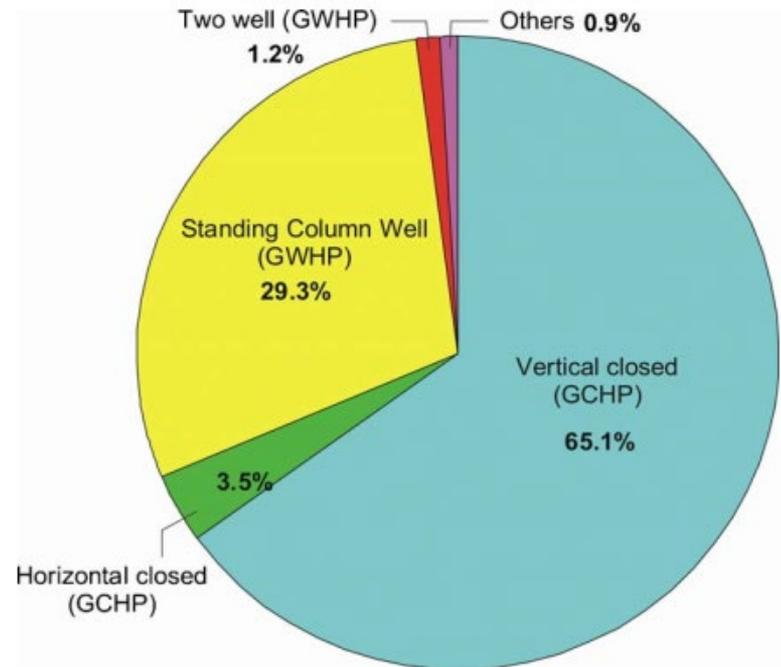
Un système bien conçu ne laisse apparaître qu'une boîte de service sur les lieux publics.

# 1 - Potentiel des PCP – Intégration en milieu urbain



# 1 - Potentiel des PCP – Intégration en milieu urbain

- 30 000 PCP seraient en opération aux États-Unis.
- Les PCP représentent 29% des installations géothermiques en Corée du Sud.
- Des mesures effectuées sur des systèmes en opération aux États-Unis ont montré que:
  - Six PCP de 455 m avaient généré des économies d'énergie de 686 820 kWh/an pendant neuf ans: **200 tonnes et 115 kW/puits !**
  - Des économies similaires pour un système de de 16 PCP et 326 thermopompes: **615 tonnes et 133 kW/puits !**
- Au Québec, une dizaine de PCP ont été construits en 2018.



## 2 – Chaire de recherche sur les PCP– Barrières au déploiement

Freins humains et organisationnels

Capacité d'absorption et  
coûts des puits d'injection

Absence de  
personnel qualifié

Arrêt des thermopompes et  
augmentation de l'appel de  
puissance

Innocuité  
environnementale ?

conception  
opération  
construction  
\$\$\$\$

Testé au Canada ?

Risques de poursuites  
légales ?

Logiciel de conception utilisés  
dans d'autres projets ?

Colmatage des puits et  
des échangeurs ?

# 2 – Chaire de recherche sur les PCP - Démonstration



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

## Projet de démonstration – Année 1

Consultants



Entrepreneurs

## Projet de démonstration – Année 3

Consultants



Entrepreneurs

## Projet de démonstration – Année 5

Consultants



Entrepreneurs



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

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

**Lever rapidement les barrières à l'utilisation des puits à colonne permanente**

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

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

## 2 – Chaire de recherche sur les PCP – Expertise multidisciplinaire

**B. Courcelles**  
Traitement de l'eau

**G. F-Ouellet**  
Géophysique

**F. Gervais**  
Géologie structurale

**F. Guibault**  
Modélisation numérique

**M. Kummert**  
Mécanique du bâtiment

**D. Millette**  
Hydrogéologie

**P. Pasquier**  
Géothermie

**J. C.-Ibarra**  
Mécanique du bâtiment

**A. Nguyen**  
Géothermie

**E. Lachapelle**  
Économie politique



**CanmetÉNERGIE**  
*Leadership en écoInnovation*

Université   
de Montréal

- 3 Projets de démonstration
- 8 Partenaires externes
- 10 Chercheurs
- 24 Projets de recherche
- 34 Étudiants



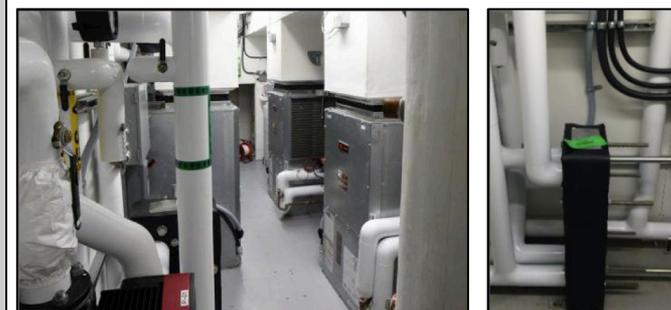
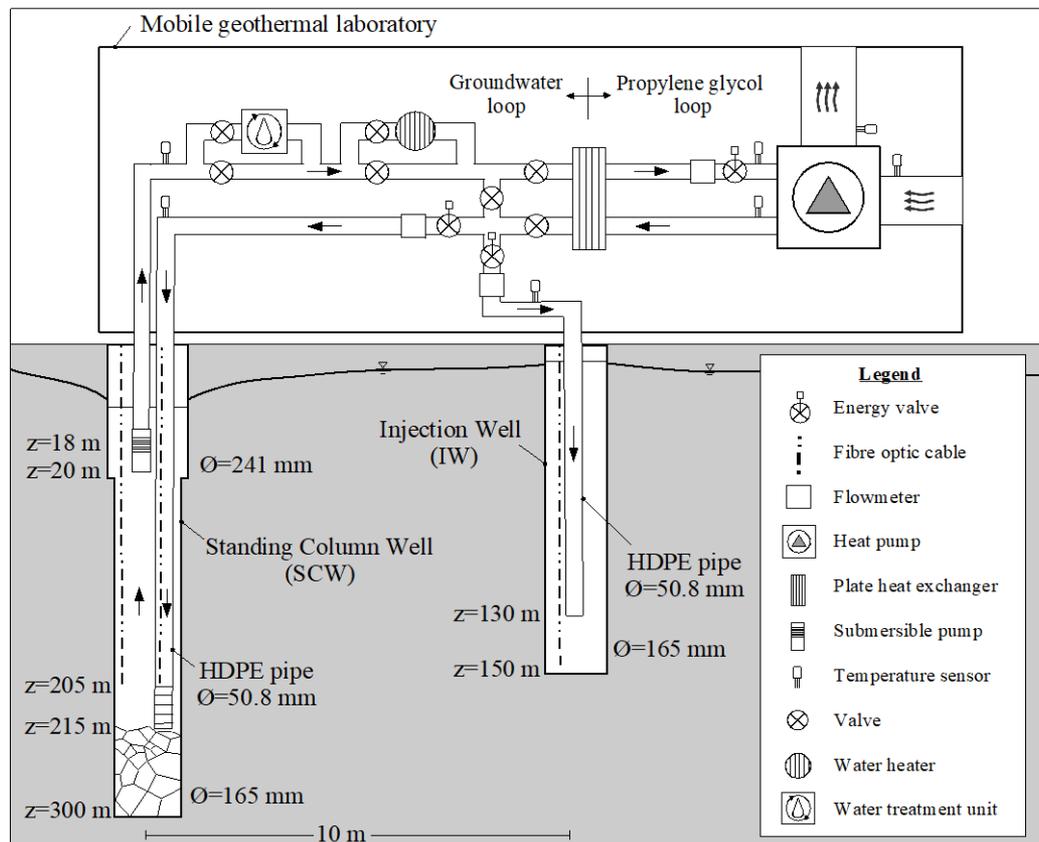
- 2.6 M\$ + les coûts de construction
- Don de 1 M\$ d'Hydro-Québec

**Activités de formation annuelles**

- 2 séminaires de formation
- 1 colloque scientifique
- 2 à 4 capsules vidéo
- Réunions de conception

### 3 - Avancements – Démonstration à l'URG

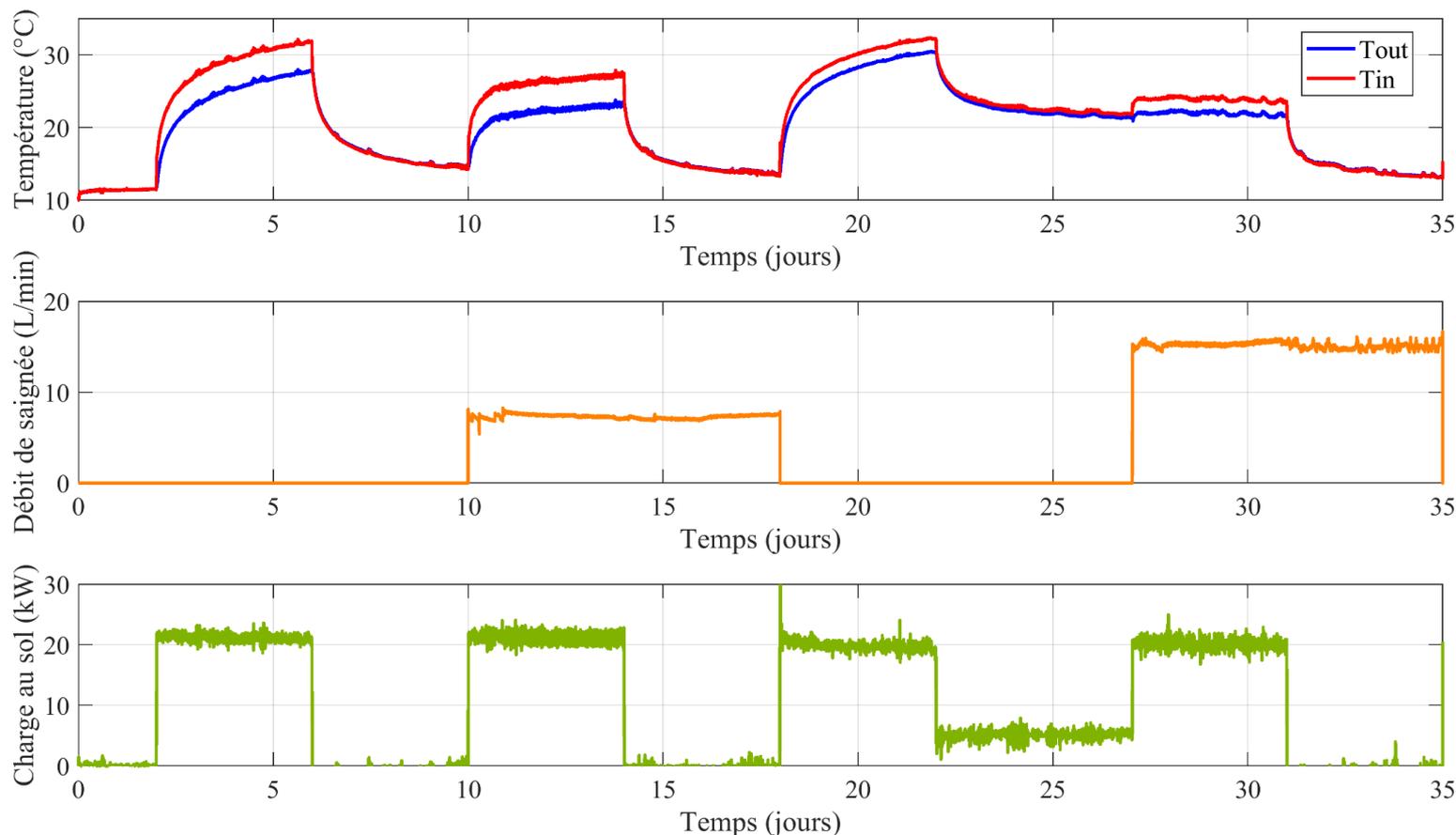
Les principaux champs de recherche touchent à la simulation des PCP, à l'évolution de la qualité de l'eau, à l'opération et au contrôle des PCP en conditions hivernales.



Afin d'étudier les PCP en conditions réelles d'opération, une unité de recherche est entrée en service à Varennes en 2016.

### 3 - Avancements – Démonstration à l'URG

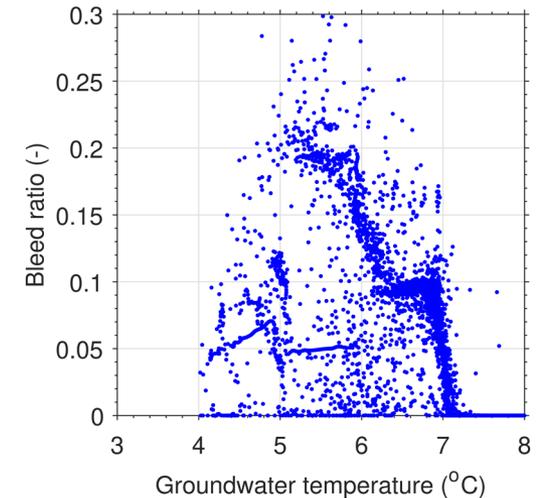
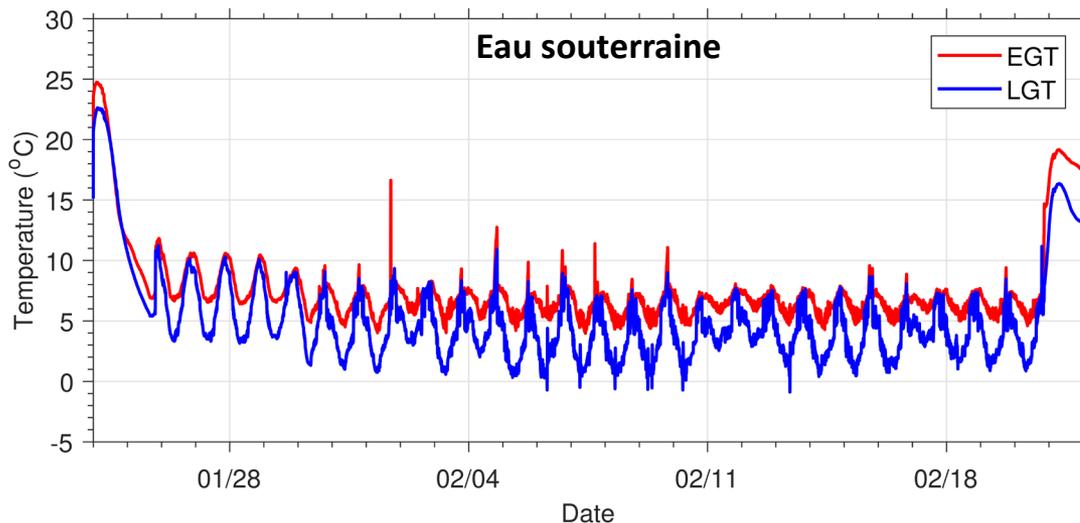
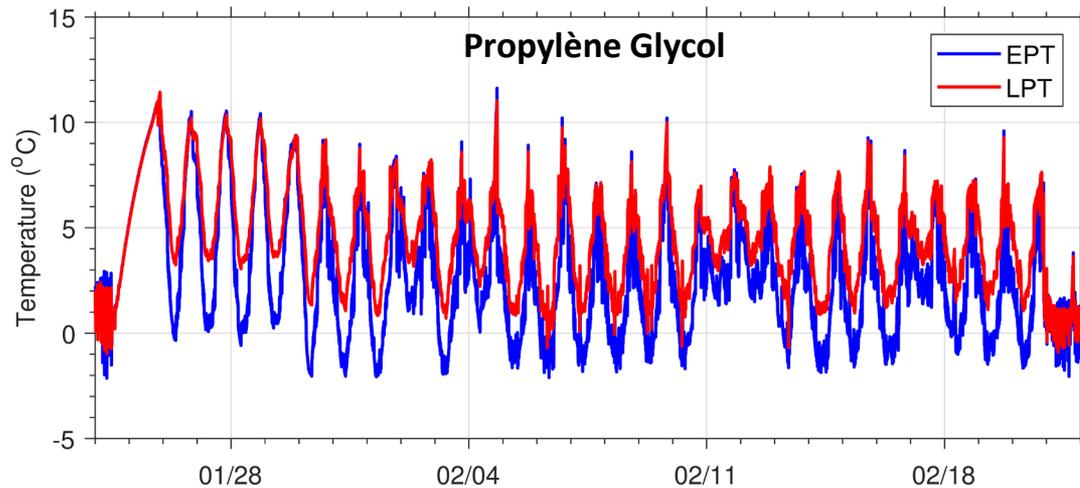
Les shales présents au site de Varennes sont très peu perméables ( $5.7 \times 10^{-7}$  m/s) et ne permettent pas d'injecter plus de 20 l/min dans le puits d'injection.



- Nos travaux confirment l'efficacité de la saignée et montrent que même une petite saignée de 16 l/min permet de stabiliser rapidement la température de l'eau.

### 3 - Avancements – Démonstration à l'URG

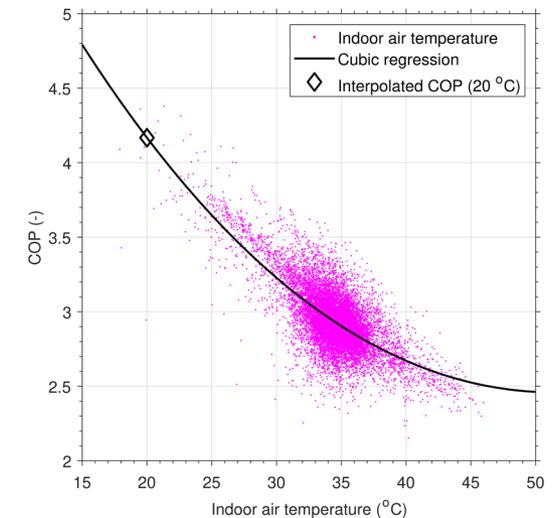
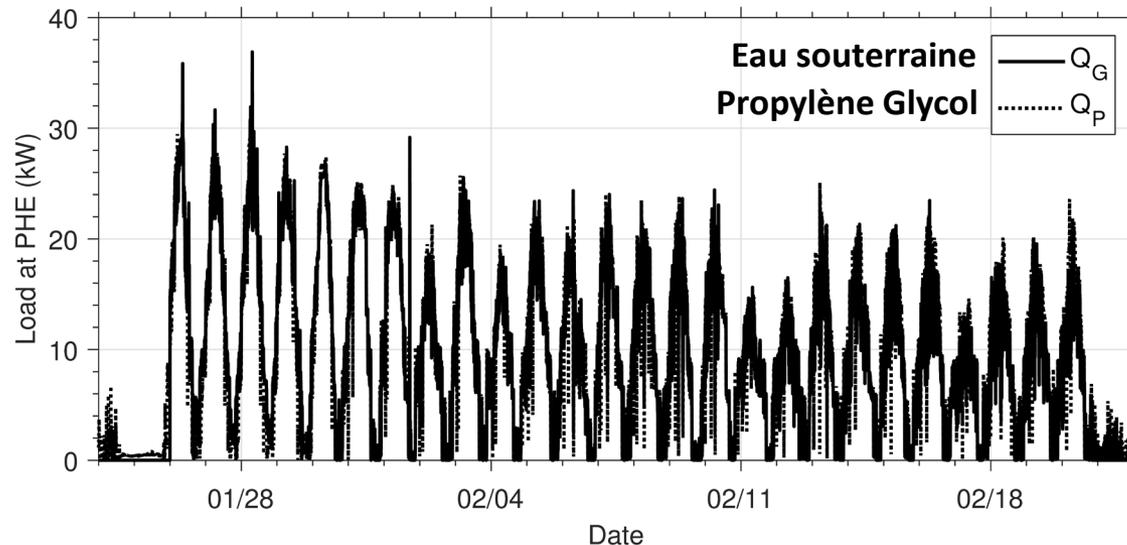
L'échangeur de chaleur a été opéré pendant 2 hivers à des températures inférieures à 0°C afin d'augmenter la puissance de chauffage fournie par le PCP.



- Aucun problème associé au gel ou au colmatage de l'échangeur n'a été observé.
- Une saignée modulée a permis de maintenir l'opération des TP et de réduire les volumes purgés.
- En moyenne, 4,6 m<sup>3</sup> d'eau purgée par jour.

### 3 - Avancements – Démonstration à l'URG

- Nos travaux montrent qu'en chauffage, la puissance en pointe d'un PCP peut atteindre 160 W/m. Par comparaison, la puissance d'un puits en boucle fermée est d'environ 50 W/m en chauffage.

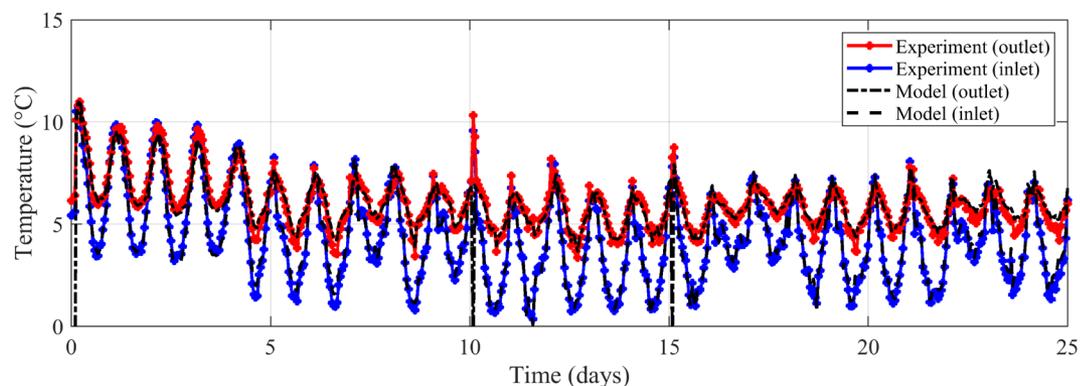
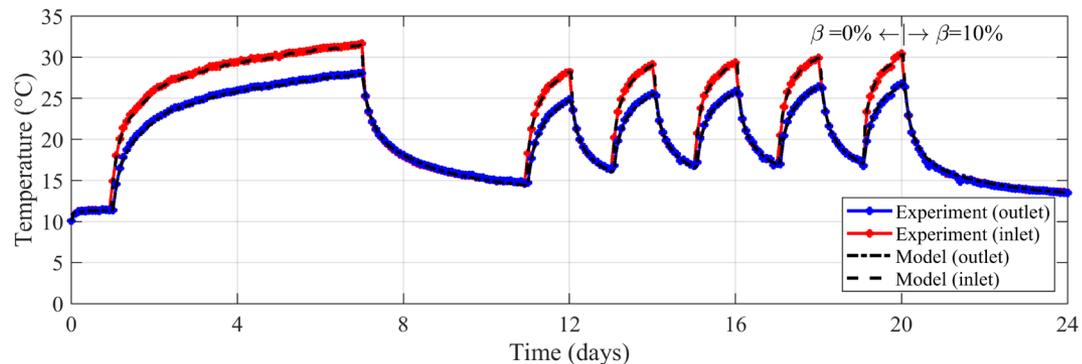
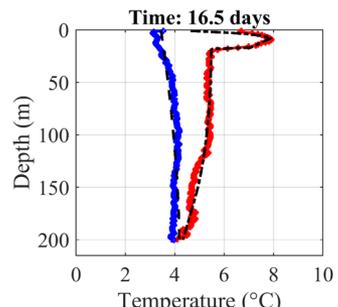
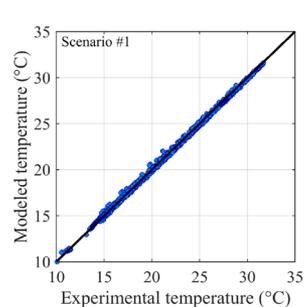
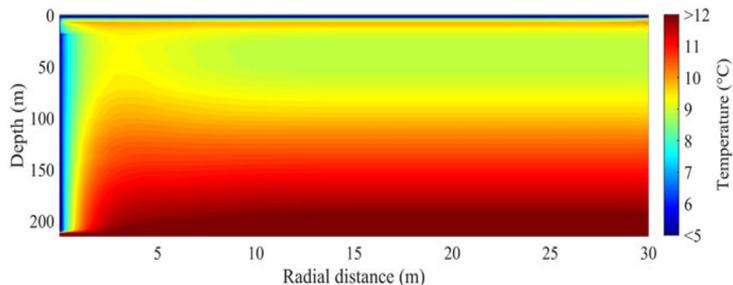


Des problèmes de contrôle des volets n'ont pas permis de maintenir une température de l'air adéquate, menant à des COP moindres qu'attendus.

- Le PCP de 215 m de Varennes a supporté l'opération des thermopompes pendant plusieurs semaines. Les charges couvertes étaient de 30 kW de chauffage à un COP moyen d'environ 3.

# 3 - Avancements – Simulation de PCP

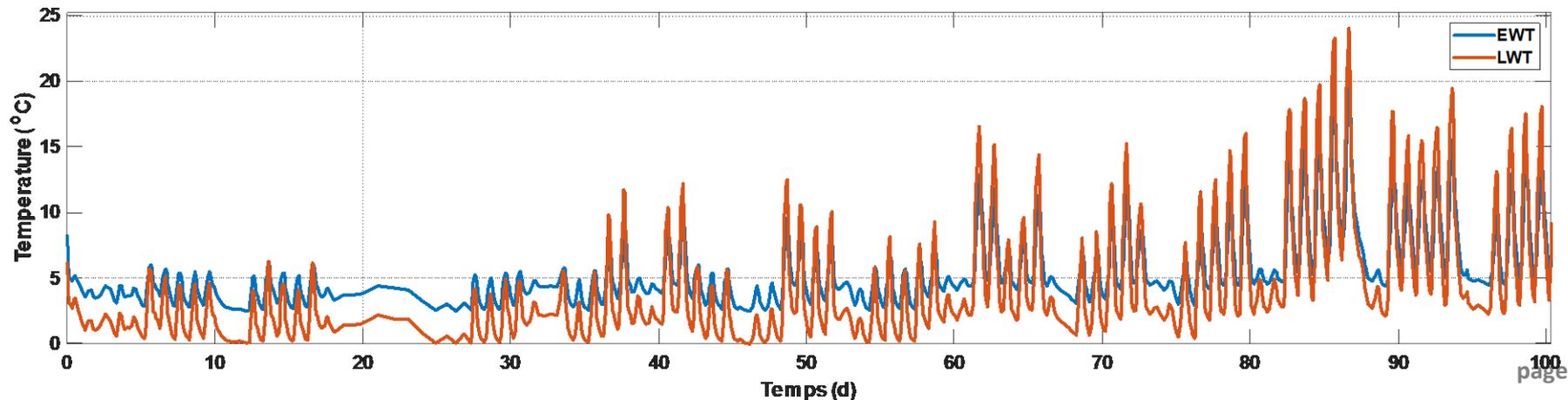
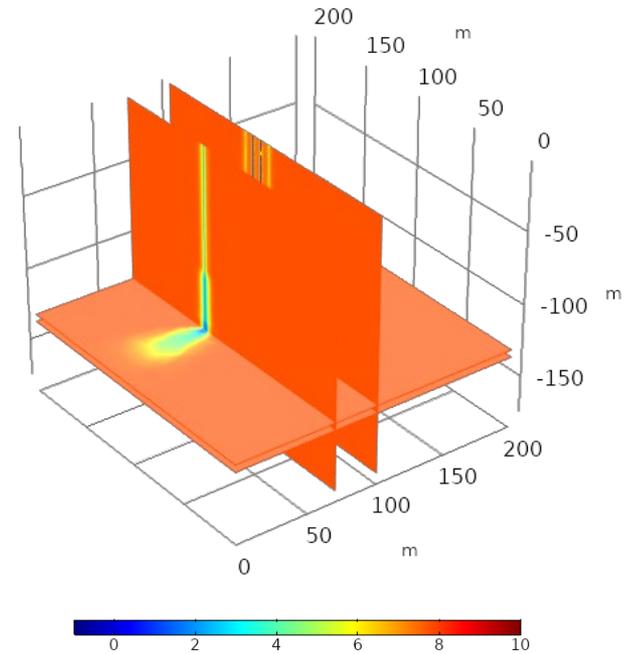
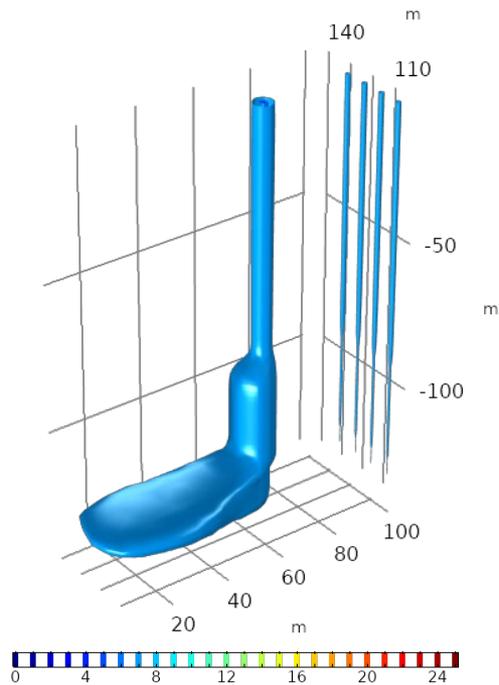
Des essais ont été réalisés pour caractériser le contexte hydrogéologique et géothermique du site de Varennes et ainsi valider un modèle numérique d'éléments finis.



- Nos travaux illustrent la capacité de ces outils à reproduire l'opération d'un PCP et l'importance d'intégrer au modèle la fracturation du socle rocheux et la puissance de la pompe submersible.

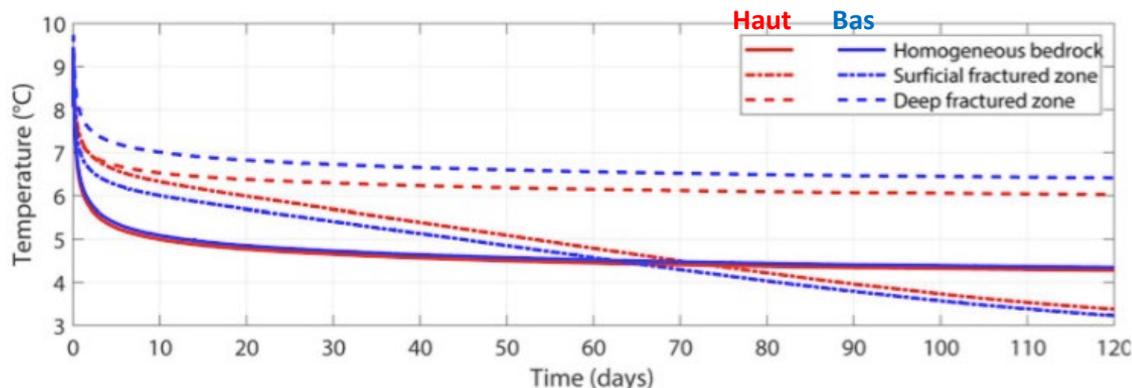
### 3 - Avancements – Simulation de PCP

Nous sommes maintenant en mesure de simuler le comportement couplé (thermique et hydraulique) d'un champ de plusieurs PCP. Les temps de calcul sont pour le moment prohibitifs.

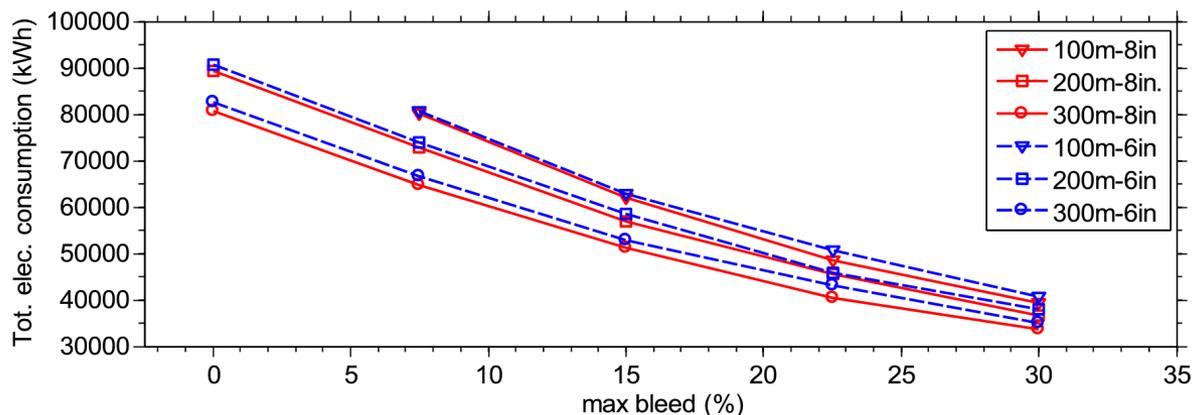


### 3 - Avancements – Simulation de PCP

- La profondeur de la zone fracturée peut influencer significativement les performances des PCP. Une fracture profonde est très favorable à l'opération de PCP en chauffage.



- Le point de prélèvement de l'eau (sommet ou base) a peu d'influence sur le rendement d'un PCP.
- Le diamètre du puits (6' ou 8') influence très peu la consommation électrique totale.



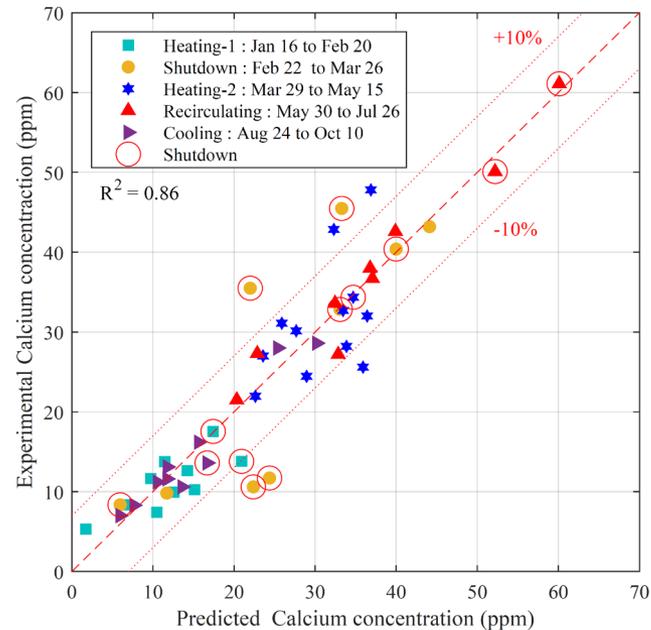
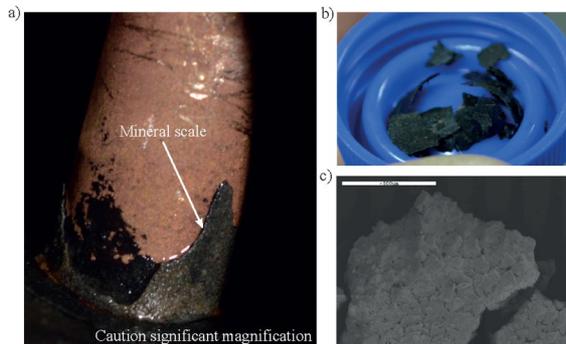
Source:

Pasquier, P., Nguyen, A., Eppner, F., Marcotte, D., Baudron, P., 2016. Standing column wells. In : Rees, S. ed. Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. Elsevier.

Beaudry, G., Pasquier, P., et Marcotte, D. (2019) The impact of rock fracturing and pump intake location on the thermal recovery of a standing column well: model development, experimental validation, and numerical analysis. Science and Technology for the Built Environment 25:8, 1052-1068.

### 3 - Avancements – Qualité de l'eau

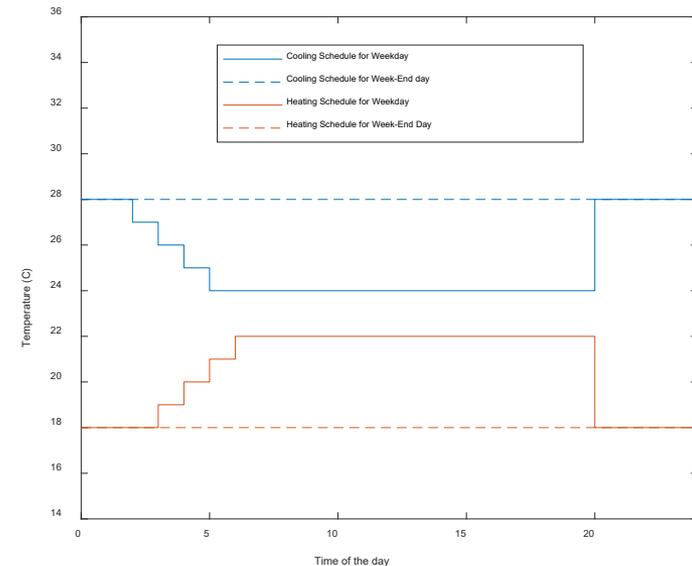
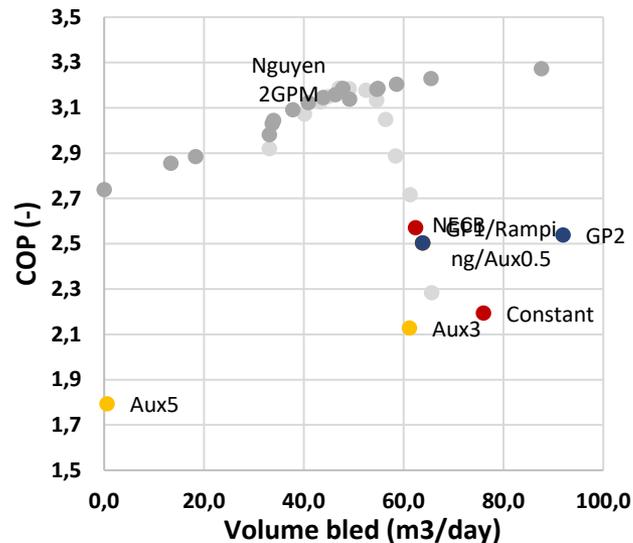
L'eau souterraine a été échantillonnée sous diverses conditions d'opération. Aucun problème majeur de colmatage n'a été observé après deux ans d'opération, mais des carbonates ont précipité sur un débitmètre et ont nuit à son fonctionnement.



- Nos travaux ont illustré qu'un petit traitement de l'eau permet d'abattre les concentrations de calcium et le risque de précipitation des carbonates.
- Les arrêts prolongés des pompes favorisent cependant la précipitation dans la tuyauterie.

# 3 - Avancements – Contrôle des pompes

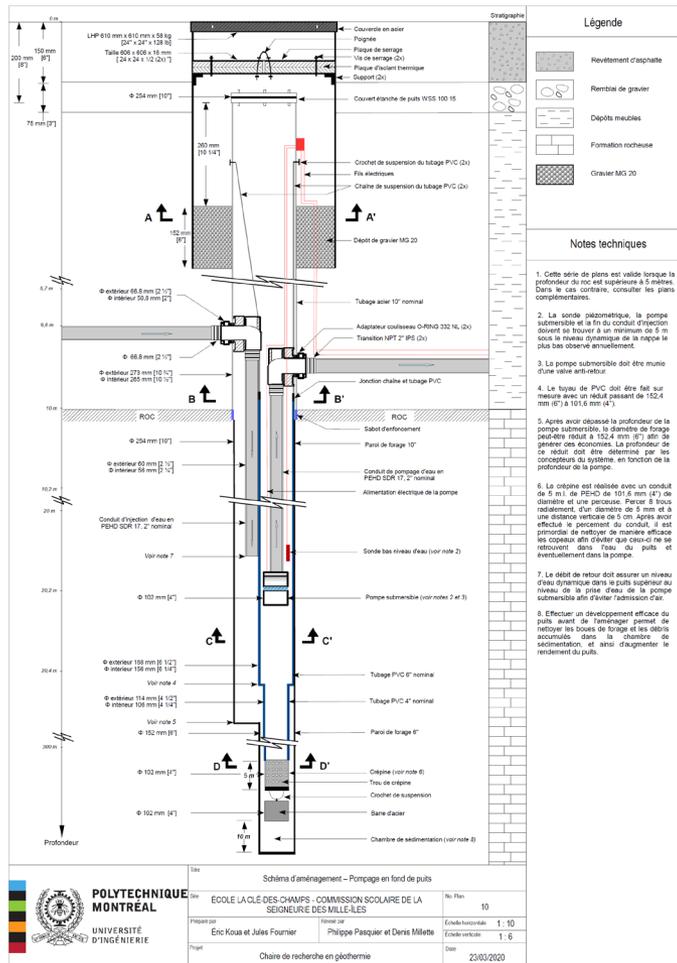
Différentes stratégies de contrôle des pompes, de la saignée et du bâtiment ont été comparées.



- Des pompes submersibles à vitesse variable (2 usgpm/tonne) réduisent la consommation d'énergie et assurent le fonctionnement des thermopompes.
- Un débit de saignée maximum de 25% variant linéairement ou activé par bande morte permet aussi de limiter les volumes saignés.
- Les coûts d'opération sont très sensibles au mode d'opération du chauffage auxiliaire. Une reprise matinale rapide devrait être évitée.

# 3 - Avancements – Construction

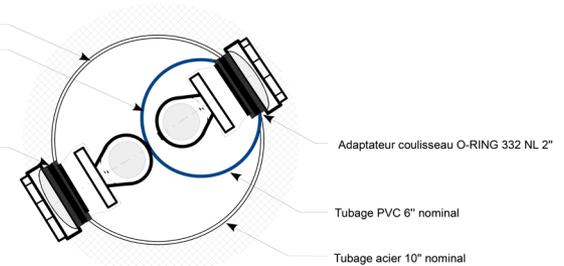
L'aménagement des PCP étant nouveau pour les entrepreneurs québécois, cette nouveauté s'exprime par des coûts de construction plus élevés.



## COUPE B-B'

- Φ extérieur 273 mm [10 3/4"]
- Φ intérieur 265 mm [10 1/2"]
- Φ extérieur 168 mm [6 1/2"]
- Φ intérieur 156 mm [6 1/4"]

- Φ extérieur 66,8 mm [2 1/2"]
- Φ intérieur 50,8 mm [2"]

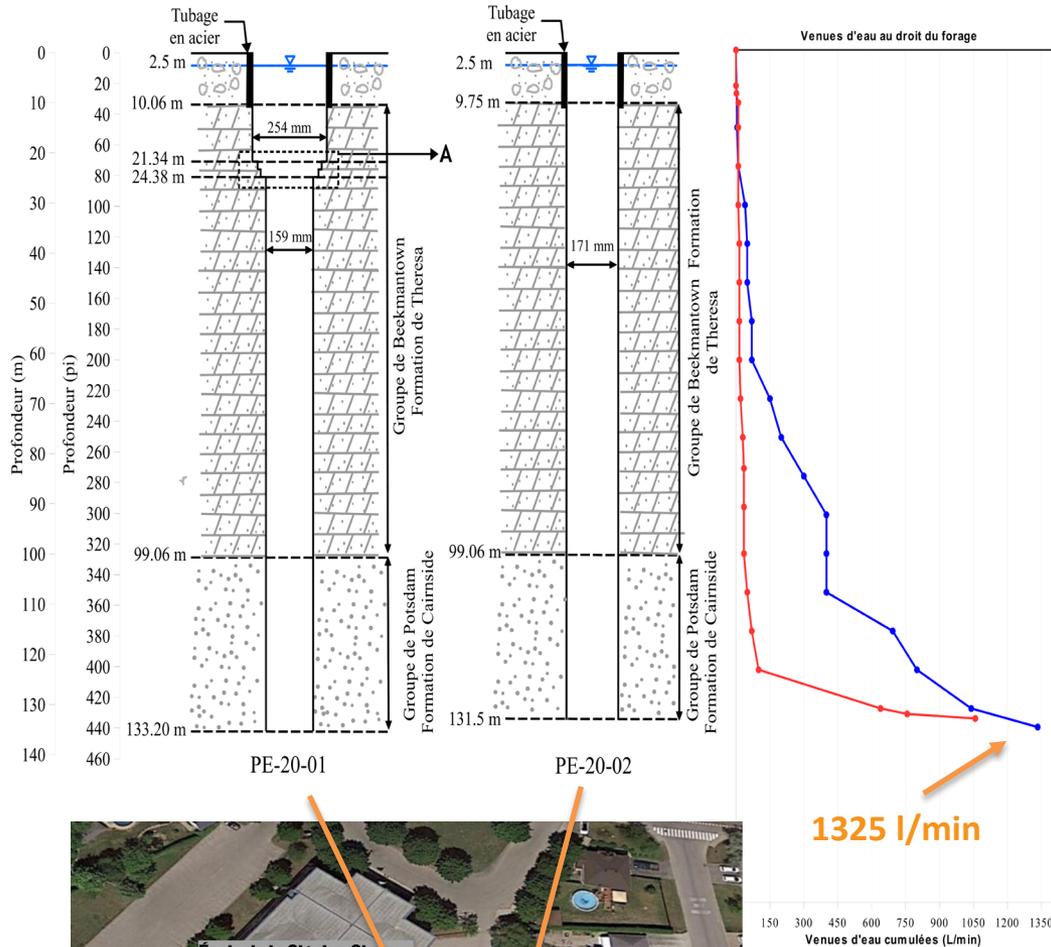


- Des plans et devis typiques d'installation de PCP sont maintenant disponibles sous:

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

# 4 – Projet réussi – Forages exploratoires

## Forages exploratoires de Mirabel (août 2020)



### 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



## 4 – Projet réussi – Échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur est l'élément le plus susceptible de s'encrasser et de limiter l'échange thermique entre le PCP et la thermopompe.



L'échangeur de chaleur Therm-X

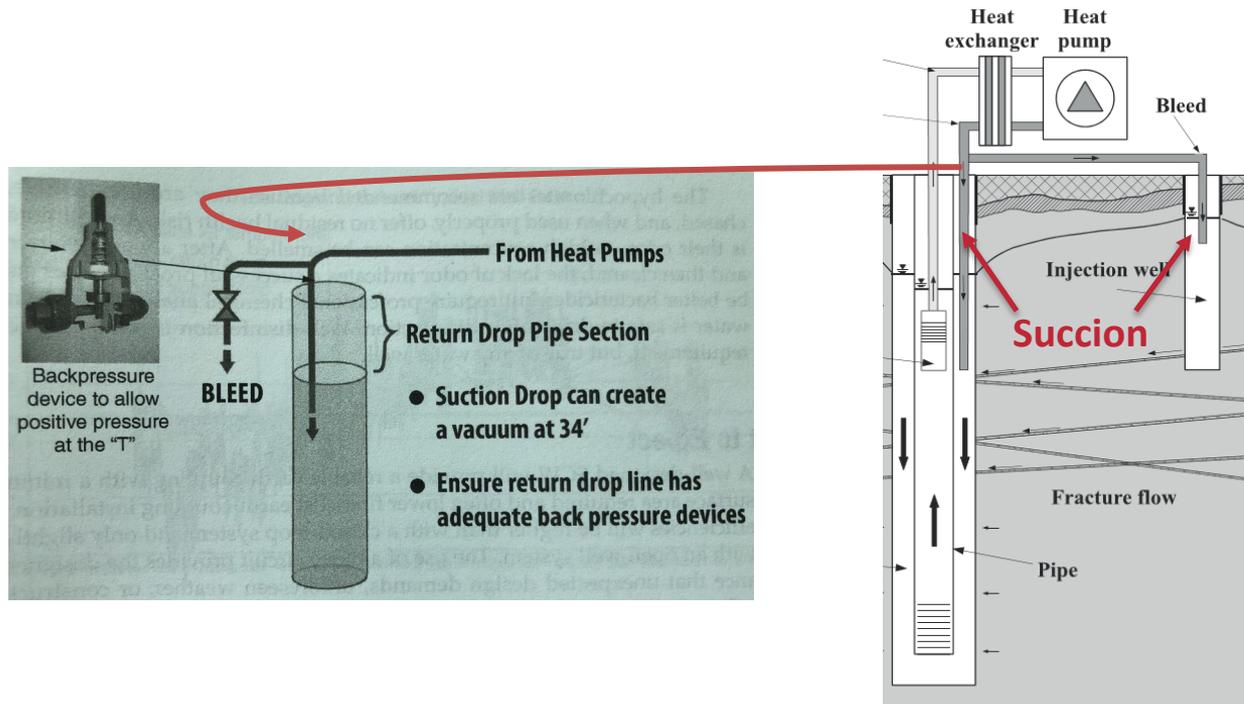
- Sélectionner un échangeur dont l'entretien est facile ou un échangeur auto-nettoyant
- Prévoir une redondance et des ports de nettoyage pour un traitement chimique
- Prévoir une mise électrique à la terre pour réduire la corrosion et l'entartrage

Source:

Gjengedal, Sondre, Lars A. Stenvik, Pål-Tore S. Storli, Randi K. Ramstad, Bernt O. Hilmo, et Bjørn S. Frengstad. « Design of Groundwater Heat Pump Systems. Principles, Tools, and Strategies for Controlling Gas and Precipitation Problems ». *Energies* 12, n° 19 (25 septembre 2019): 3657.

## 4 – Projet réussi – Équilibrage des débits

L'opération de plusieurs PCP suppose qu'un débit identique est prélevé dans les PCP du système. Les débits de recirculation et de saignée doivent être équitablement répartis entre les PCP et les PI.



- Prévoir suffisamment de valves et de manomètres pour ajuster facilement les débits
- Éviter à tout prix des succions > 34 pi dans les tuyaux de retour verticaux
- Éviter de dénoyer les pompes submersibles (sondes de bas niveaux, contrôle, etc.)

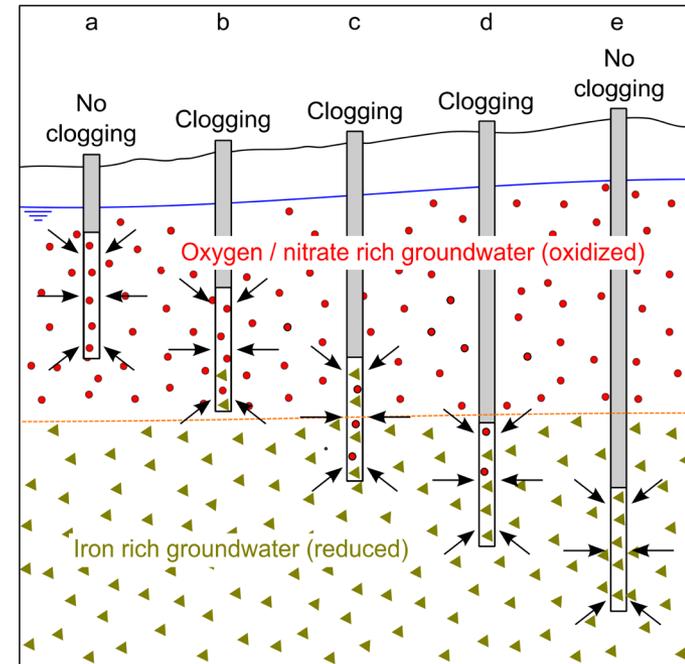
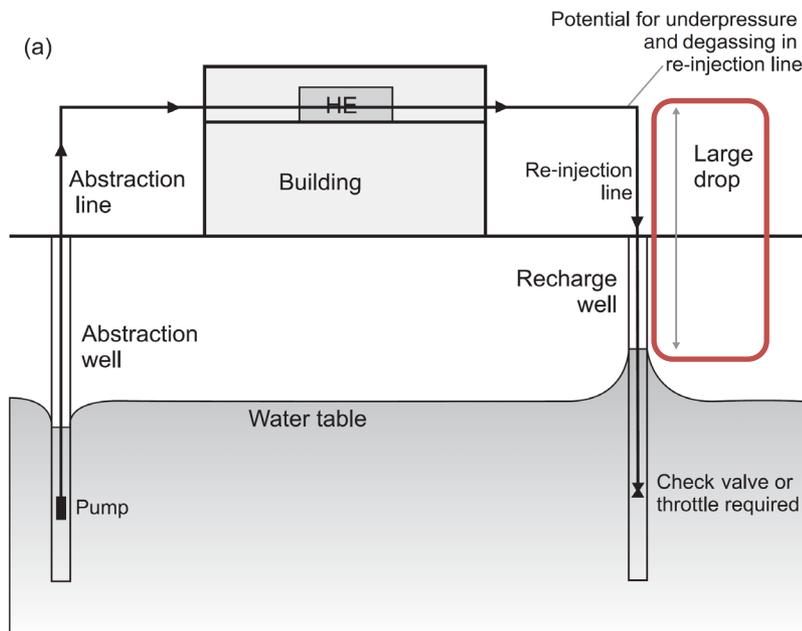
Source:

Egg, J., Cunniff, G., & Orio, C. (2013). *Modern Geothermal HVAC Engineering and Control Applications*. McGraw Hill Professional.

Pasquier, P., Nguyen, A., Eppner, F., Marcotte, D., Baudron, P., 2016. Standing column wells. In : Rees, S. ed. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Elsevier.

## 4 – Projet réussi – Empêcher l'aération de l'eau

La présence d'air dans l'eau souterraine favorise la croissance bactérienne et la précipitation de minéraux dans les puits, et réduit la conductivité hydraulique autour des puits d'injection, ce qui peut mener à son débordement.



- Éviter des succions > 34 pi dans les tuyaux de retour verticaux au moyen de réducts.
- Éviter de faire cascader l'eau dans l'air et sceller les têtes des puits.
- Éviter de mélanger des eaux souterraines ayant des signatures géochimiques différentes

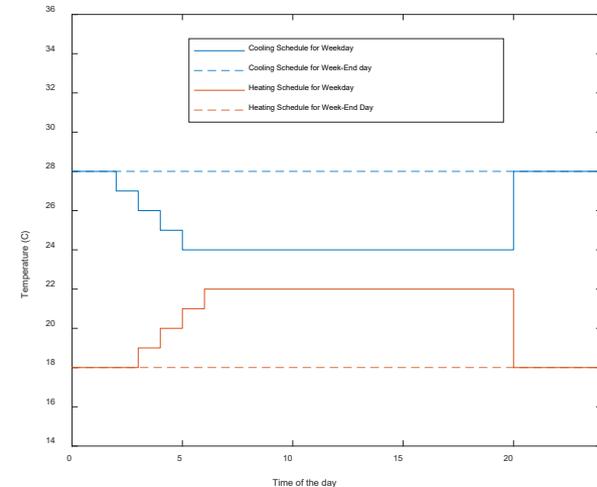
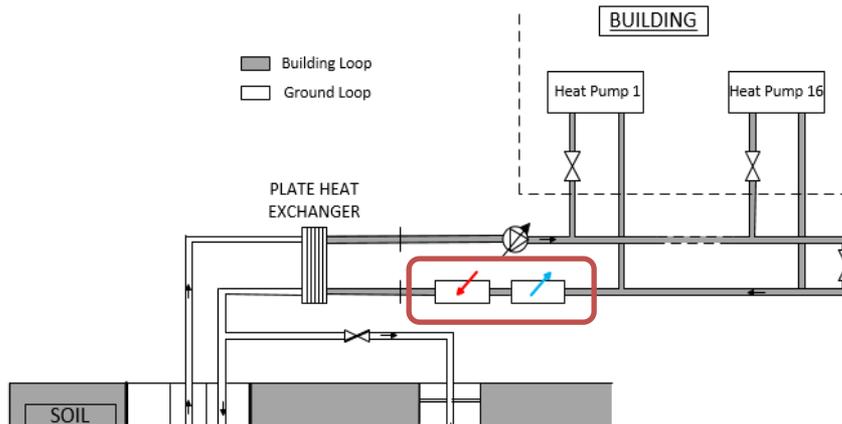
Source:

Banks, D. (2012). *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. John Wiley & Sons.

Possemiers, Mathias, Marijke Huysmans, Christian Anibas, Okke Batelaan, et Jos Van Steenwinkel. « Reactive Transport Modeling of Redox Processes to Assess Fe(OH)<sub>3</sub> Precipitation around Aquifer Thermal Energy Storage Wells in Phreatic Aquifers ». *Environmental Earth Sciences* 75, n° 8 (avril 2016): 648. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5398-7>.

## 4 – Projet réussi – Contrôle et chauffage auxiliaire

Le risque de geler l'eau souterraine dans l'échangeur de chaleur et de fracturer ce dernier est réel.



- L'installation d'une chaudière sur la boucle glycolée en amont de l'échangeur permet de réduire le risque de gel et de couvrir les pointes.
- Les coûts d'opération sont très sensibles au mode d'opération du chauffage auxiliaire. Une reprise matinale rapide devrait être évitée.

## 4 – Projet réussi – Traitement de l'eau

Le traitement de l'eau et sa filtration peuvent être requis si la qualité physico-chimique de l'eau souterraine est mauvaise.

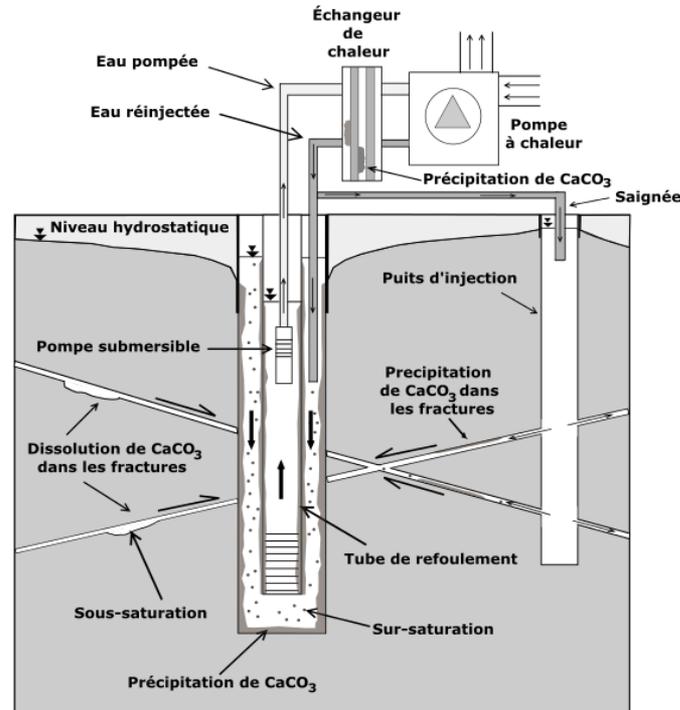


- La filtration de l'eau permet de réduire les matières en suspension.
- Si les risques de biocolmatage sont élevés, un traitement à l'ozone ou aux UV pourrait être nécessaire.
- Si la saignée est importante, un traitement pourrait ne pas être efficace.



## 4 – Projet réussi – Entretien préventif

On procède au changement d'huile d'une voiture régulièrement, c'est la même chose avec des PCP!



- Une purge saisonnière vers l'égoût du PCP permet de réduire facilement les pertes de charge, et les matières en suspension dans l'eau.
- Un traitement à l'acide des échangeurs de chaleur en basse saison (avec une petite unité de pompage) évite des pertes d'efficacité en haute saison.
- L'entretien des puits d'injection ne demande pas nécessairement l'utilisation d'une foreuse.

## 5 – Conclusions

En résumé:

- Les économies d'énergies et financières associées aux PCP sont avérées dans le nord-est des États-Unis. Il reste à le démontrer au Québec.
- Dans un contexte géologique et climatique québécois, la puissance en pointe d'un PCP peut atteindre 160 W/m en chauffage.
- Un important programme de recherche visant à accélérer le déploiement des PCP est en cours.
- Le succès d'un projet comprenant des PCP repose en grande partie sur une conception minutieuse du réseau hydraulique, sur l'utilisation de séquences de contrôle adéquate et sur un entretien préventif régulier.



# Questions ?



## Questions ?

[philippe.pasquier@polymtl.ca](mailto:philippe.pasquier@polymtl.ca)



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

[Chaire de recherche en géothermie](#)

