



# SURVOL DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES COMMERCIAUX

Philippe Pasquier, ing., Ph.D.  
Département des génies civil, géologique et des mines  
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL

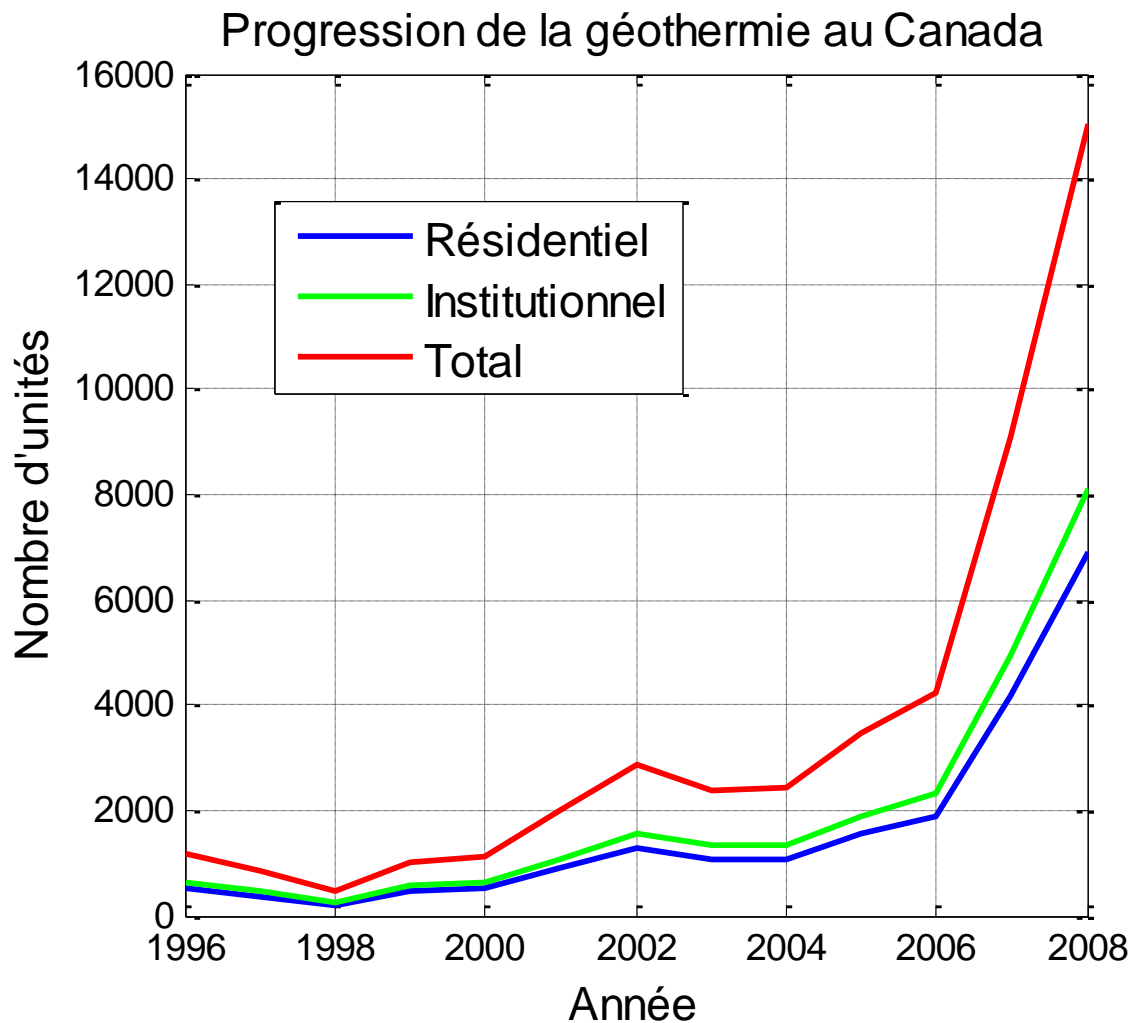


# Plan de la conférence



- Généralités
- Géothermie de basse température
  - Boucle ouverte
  - Puits à colonne
  - Boucle fermée
- De l'exploration à la construction
  - Forage exploratoire
  - Essai de réponse thermique
  - Dimensionnement
  - Construction
- Conclusion et questions

La géothermie a connu une importante croissance au Canada entre 2006 et 2012.



L'efficacité d'un système de chauffage et de climatisation s'évalue en termes de coefficient de performance (COP)

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance produite}}{\text{Puissance utilisée}}$$

	COP
Chauffage électrique	: 1
Chauffage/climatisation par géothermie	: 3 @ 5
Géothermie avec stockage thermique	: > 5

Les coûts de chauffage/climatisation d'un système géothermique BT sont<sup>1</sup> :

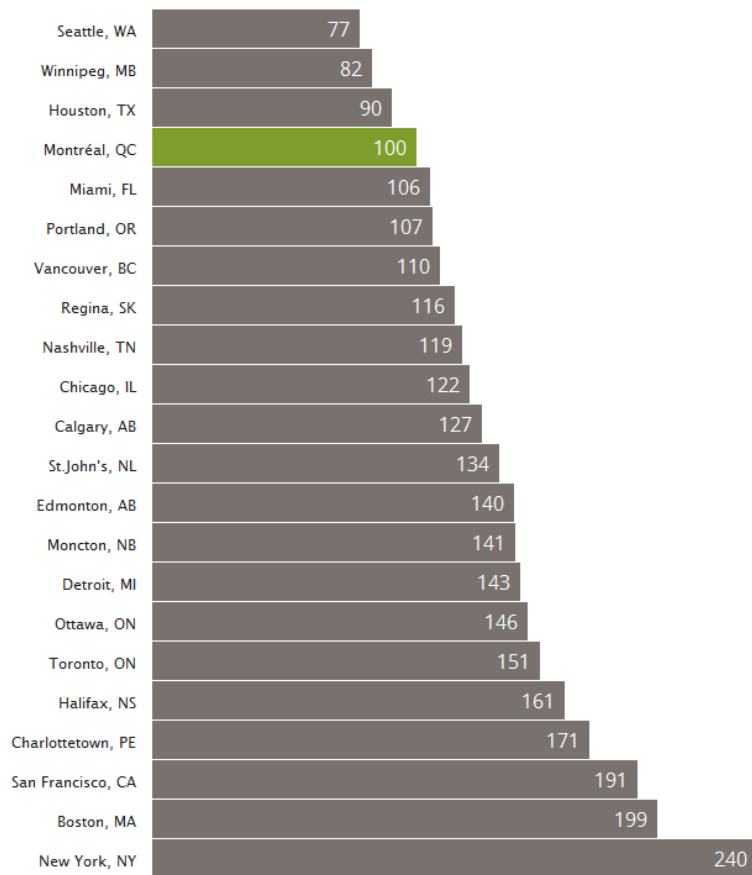
- 70% moindres qu'un système de chauffage électrique
- 35% moindres qu'un climatiseur EnergyStar

<sup>1</sup> Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (2007)

## Variabilité des prix de l'énergie au Québec

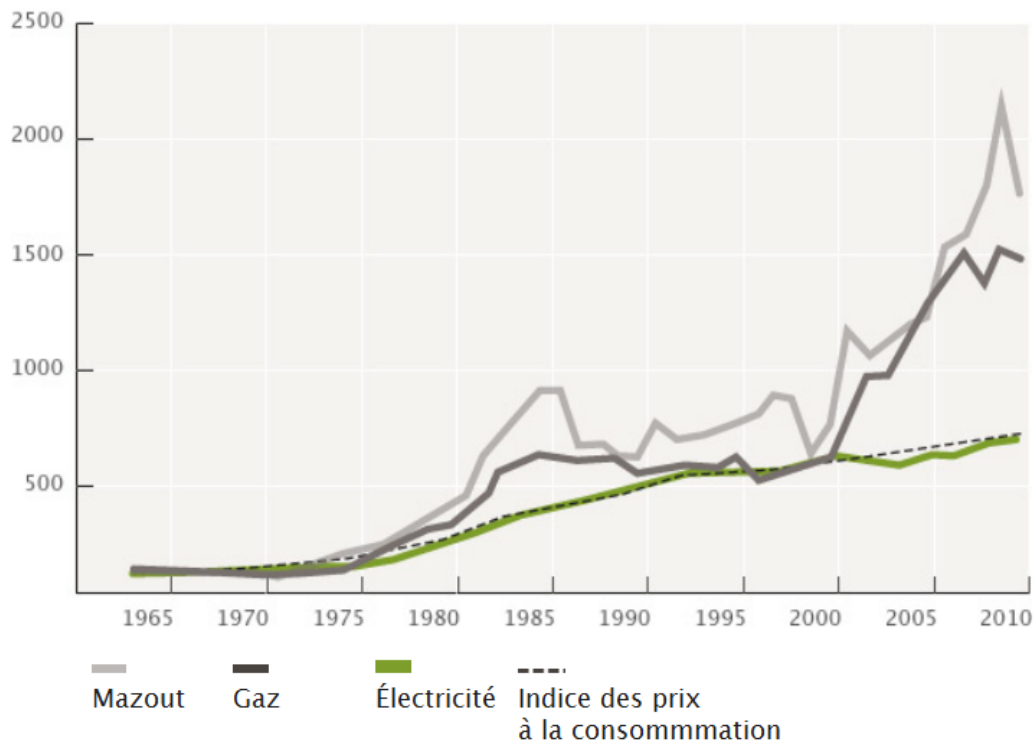
### INDICE COMPARATIF DES PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ

Consommation : 10 000 kWh/mois, Puissance : 40 kW

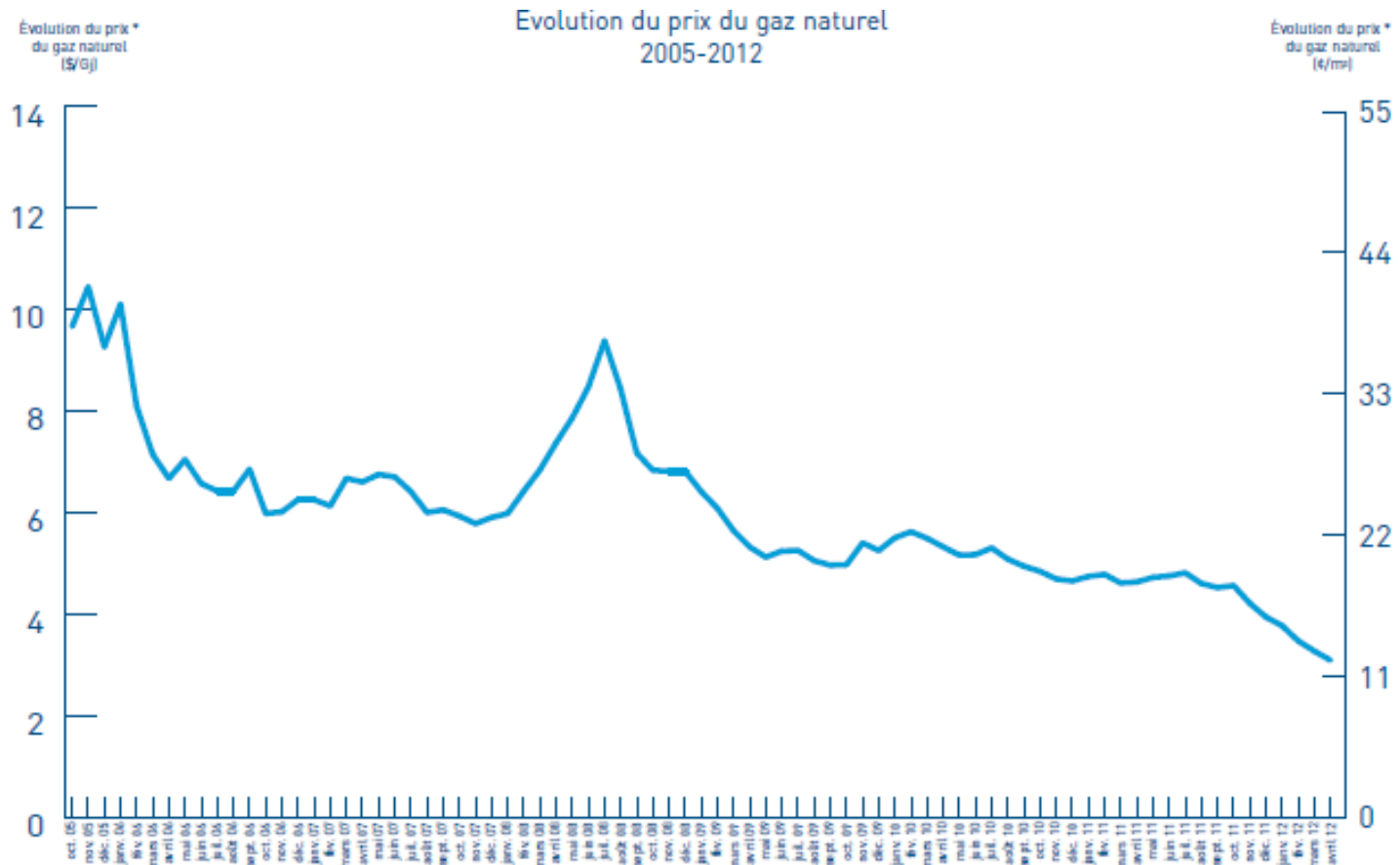


### ÉVOLUTION DE L'INFLATION ET DES PRIX DE L'ÉNERGIE AU QUÉBEC

Toutes clientèles confondues, de 1963 à 2009  
Indice (1963 = 100)



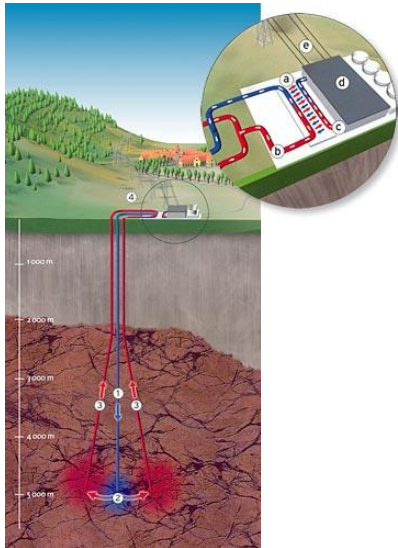
La mise en marché du gaz naturel provenant des shales américains a provoqué une diminution importante des prix et de la volatilité du gaz naturel.



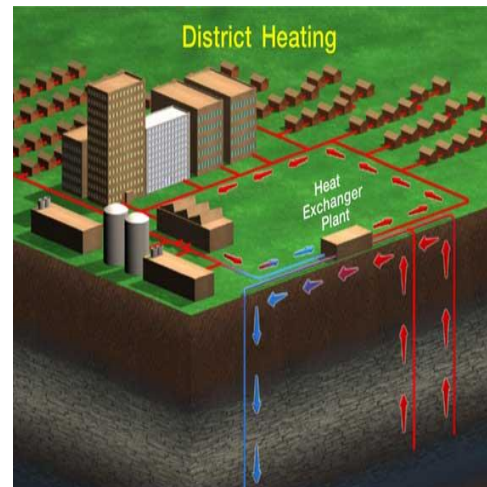
\* le prix de la fourniture du gaz naturel seulement

On définit la ressource géothermique selon la température:

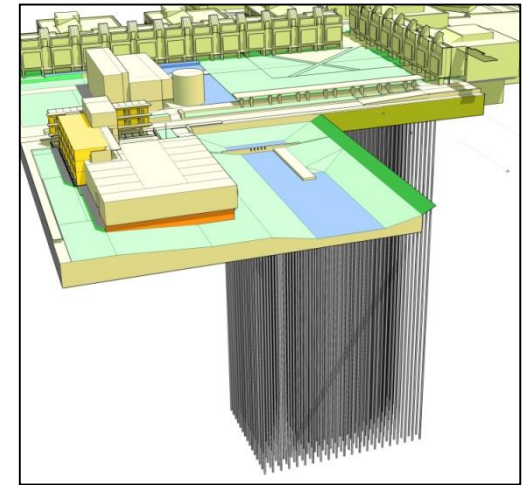
- Haute température ( $>150\text{ °C}$ ) - Production électrique.
- Moyenne température ( $<150\text{ °C}$ ) - Applications “directes”.
- Basse température ( $<32\text{ °C}$ ) - Applications avec pompes à chaleur.



Haute température



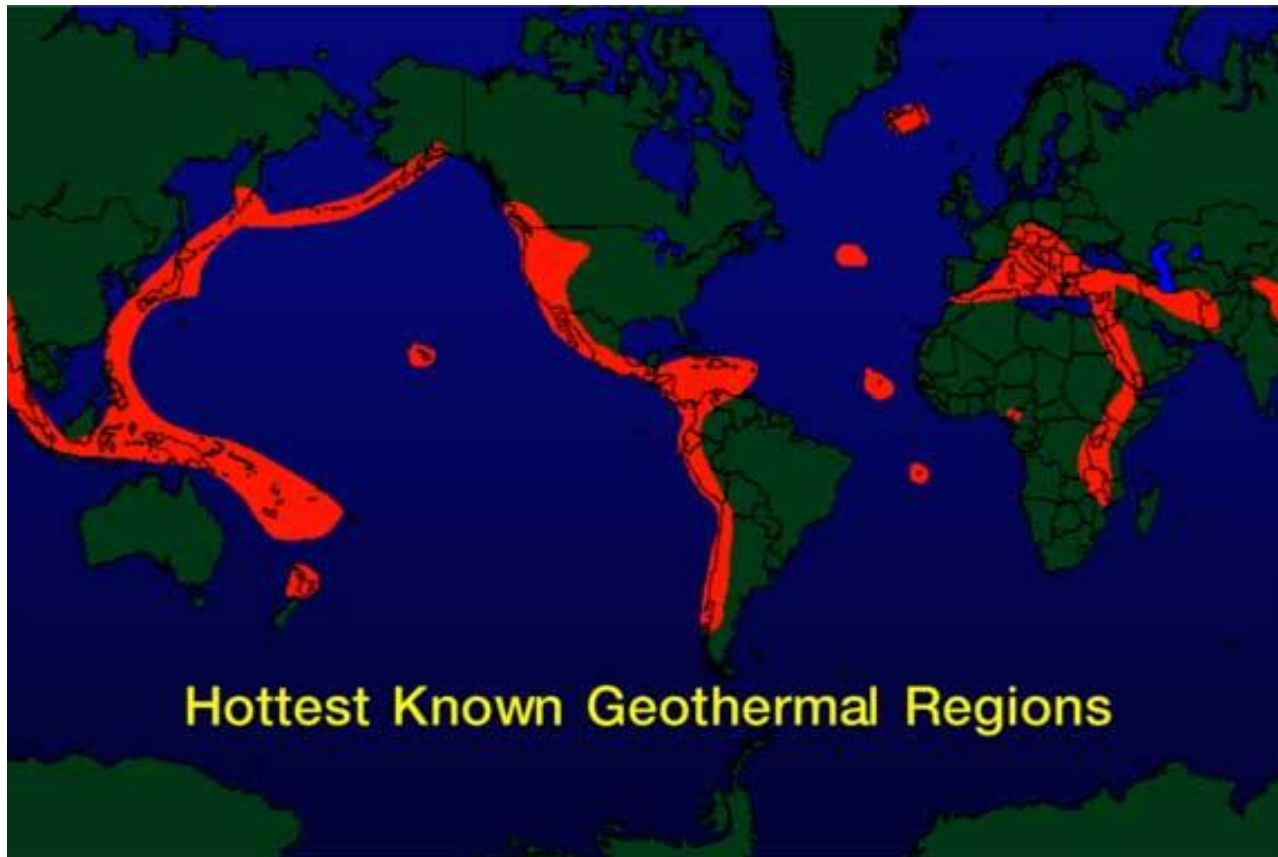
Moyenne température



Basse température

# Généralités

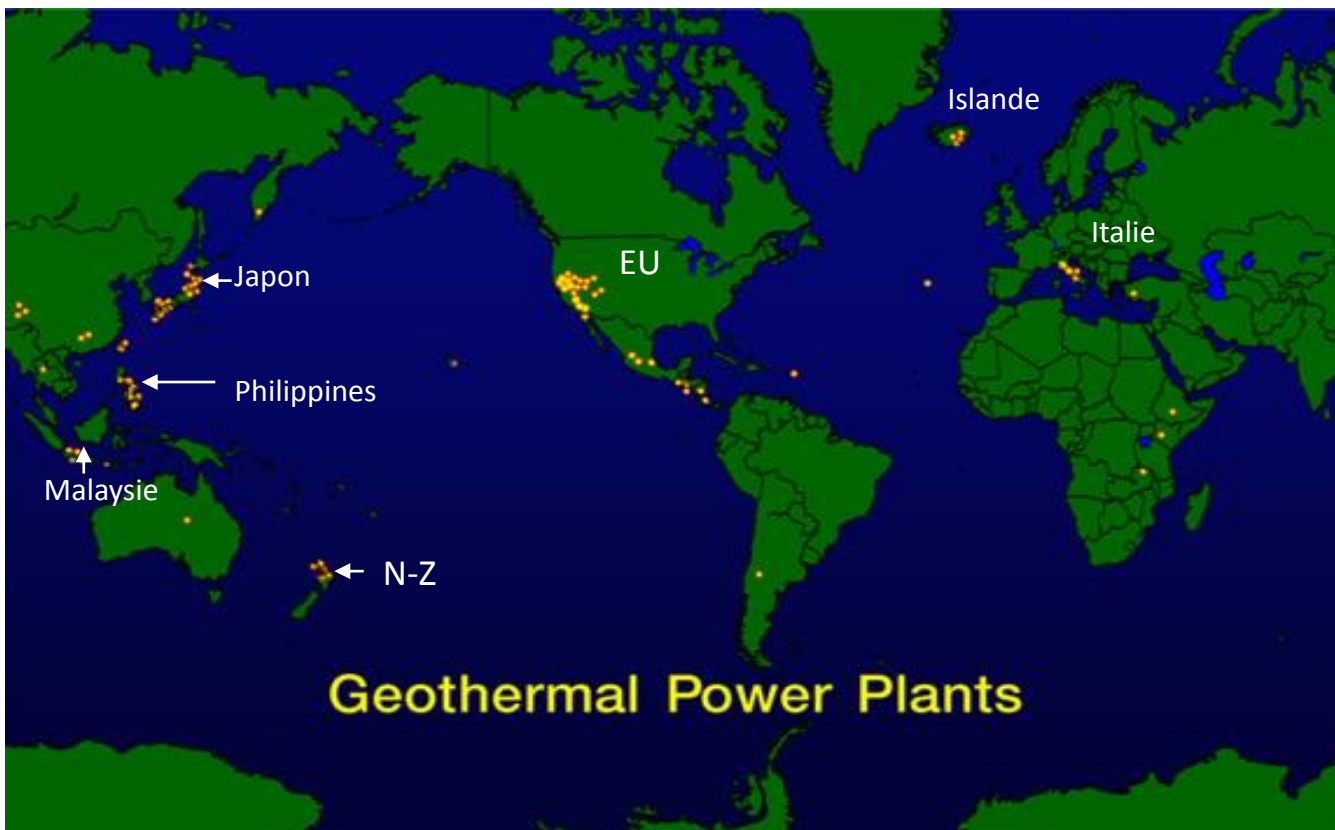
Les endroits propices à la géothermie de haute température sont associés à des rifts continentaux (Afrique) ou océaniques (médio-atlantique), à des zones de subduction (Rocheuses, Japon) ou des points chauds (Hawaii).





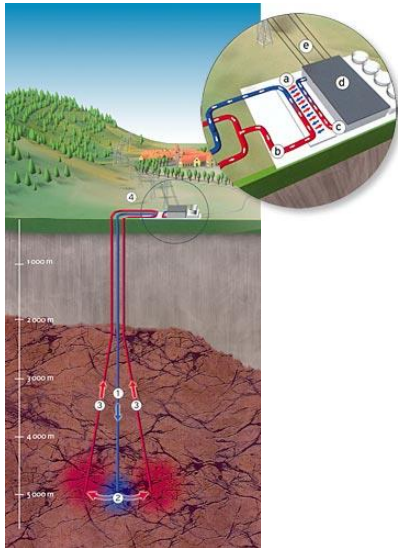
# Généralités

Les endroits propices à la géothermie de haute température sont associés à des rifts continentaux (Afrique) ou océaniques (médio-atlantique), à des zones de subduction (Rocheuses, Japon) ou des points chauds (Hawaii).

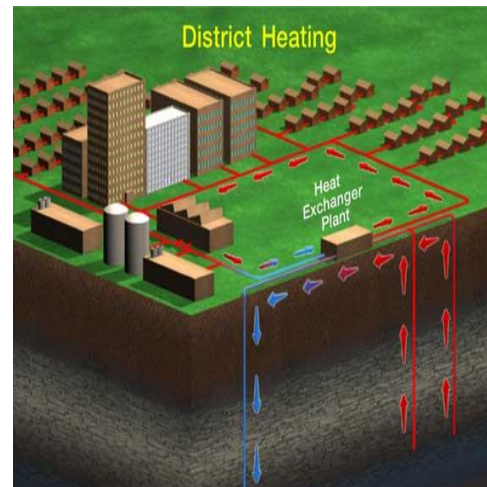


On définit la ressource géothermique selon la température:

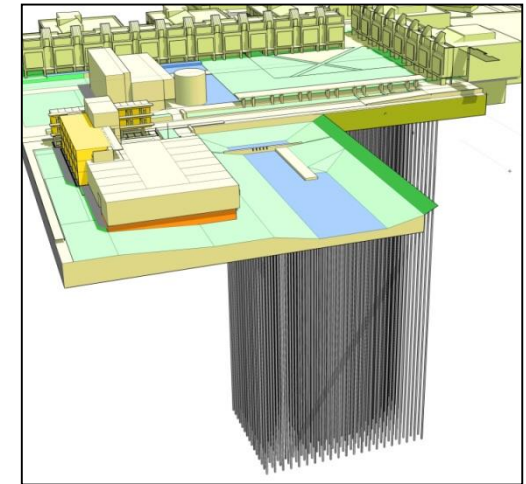
- Haute température ( $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Production électrique.
- Moyenne température ( $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Applications “directes”.
- Basse température ( $<32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Applications avec pompes à chaleur.



Haute température

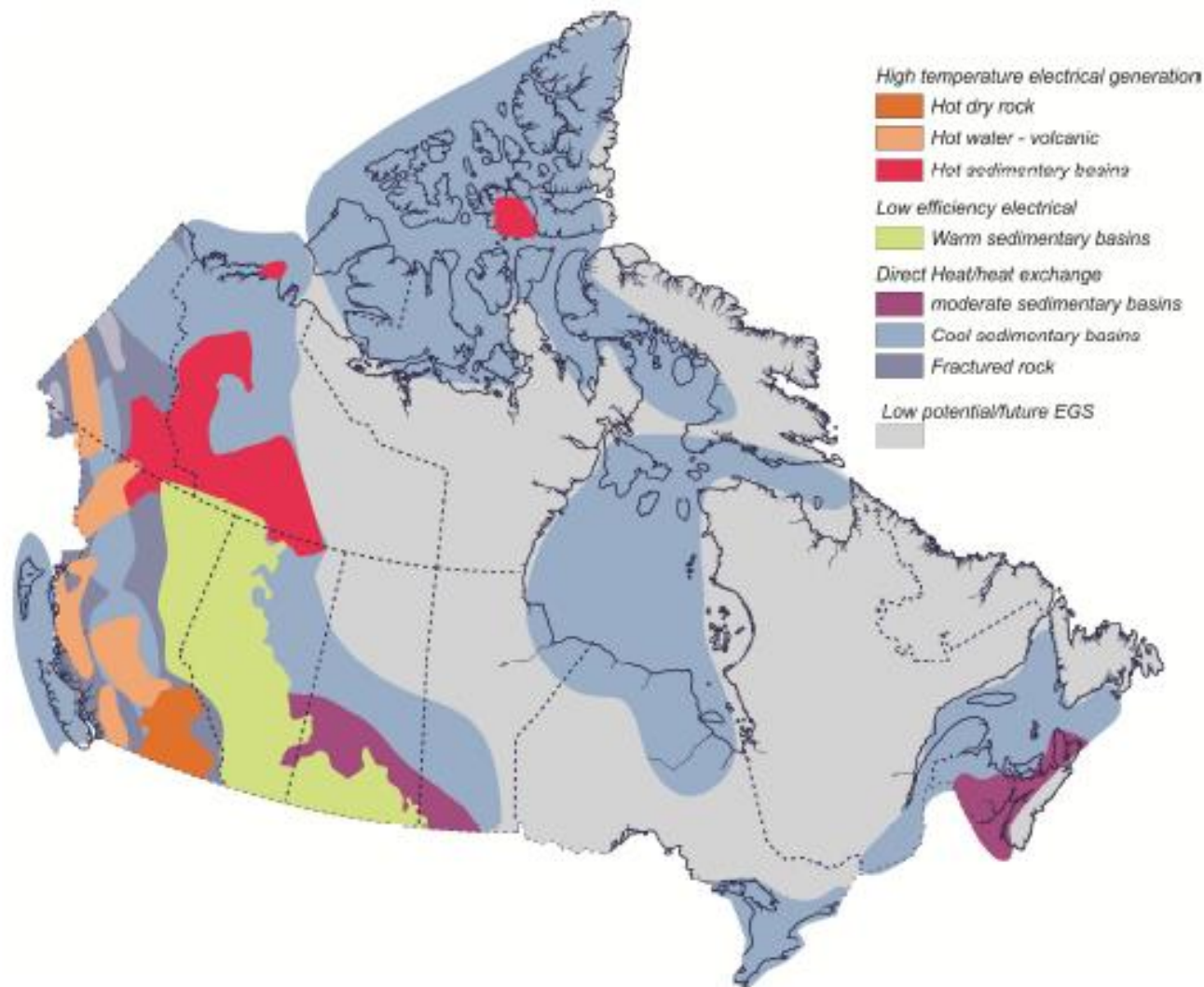


Moyenne température



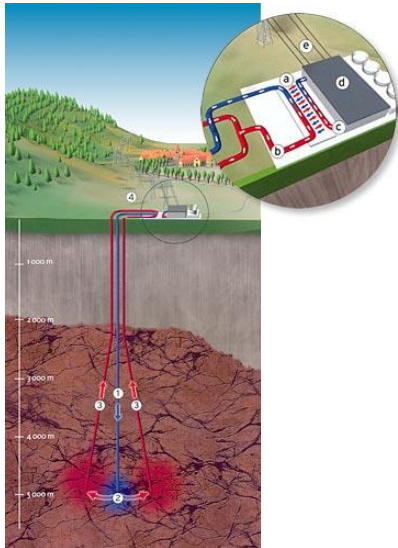
Basse température

## Potentiel géothermique du Canada

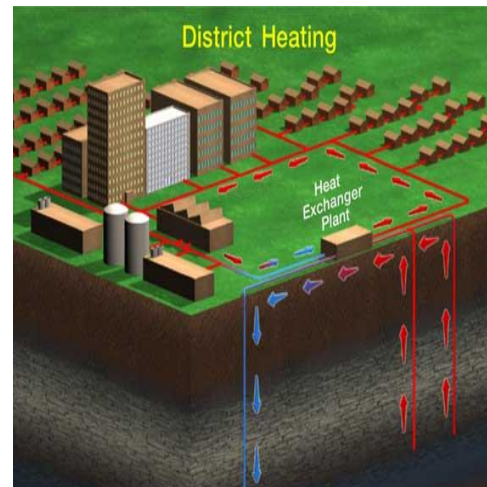


On définit la ressource géothermique selon la température:

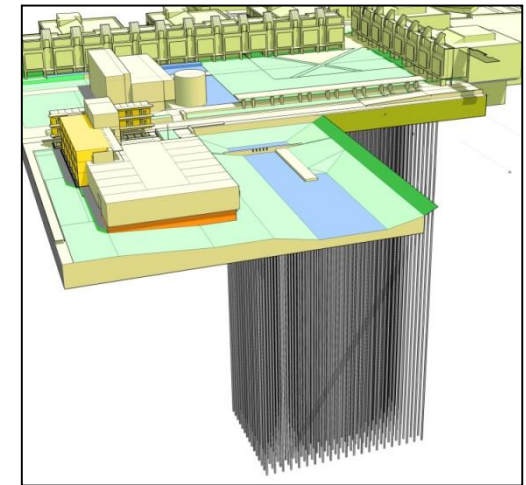
- Haute température ( $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Production électrique.
- Moyenne température ( $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Applications “directes”.
- Basse température ( $<32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - Applications avec pompes à chaleur.



Haute température



Moyenne température



Basse température

# Plan de la conférence



- Généralités
- **Géothermie de basse température**
  - Boucle ouverte
  - Puits à colonne
  - Boucle fermée
- De l'exploration à la construction
  - Forage exploratoire
  - Essai de réponse thermique
  - Dimensionnement
  - Construction
- Conclusion et questions

# Géothermie de basse température

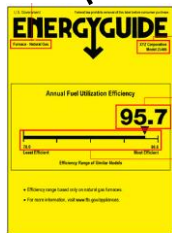
Tarif d'électricité



Pompe à chaleur

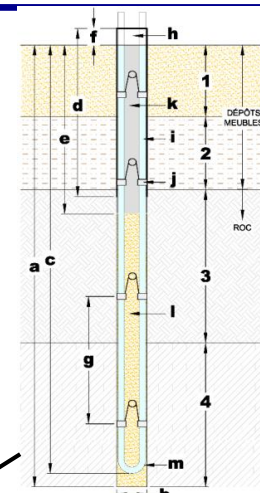
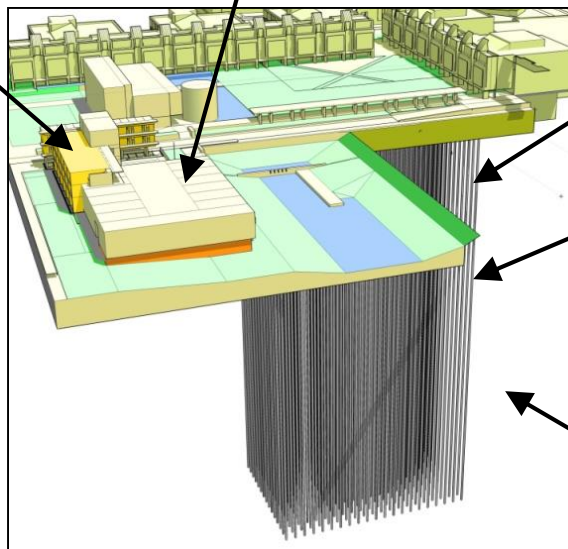
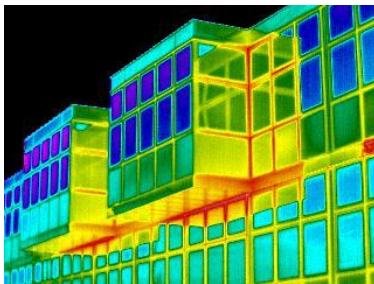


Consigne

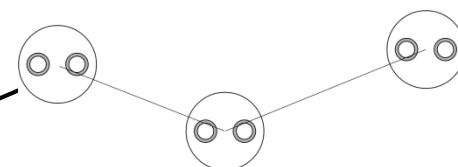


Efficacité

Pertes thermiques



Puits géothermique



Distance entre les puits



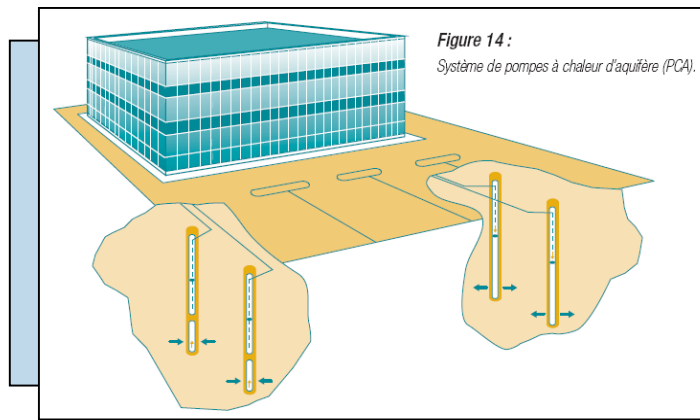
Propriétés thermiques

<http://www.waterfurnace.com/geothermal-heat-pumps.aspx> , [www.infraredvision.co.uk/buildings/](http://www.infraredvision.co.uk/buildings/)  
[www.archiexpo.com/prod/siemens-building-technologies/temperature-detectors-728-1108419.html](http://www.archiexpo.com/prod/siemens-building-technologies/temperature-detectors-728-1108419.html)

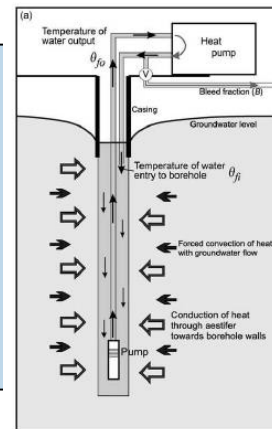
Marc Rosen, The Canadian Strategic Research Network on Ground-Source Heat Pumps, 3rd National GeoExchange Business & Policy Forum, Toronto, 2008.

# Géothermie de basse température

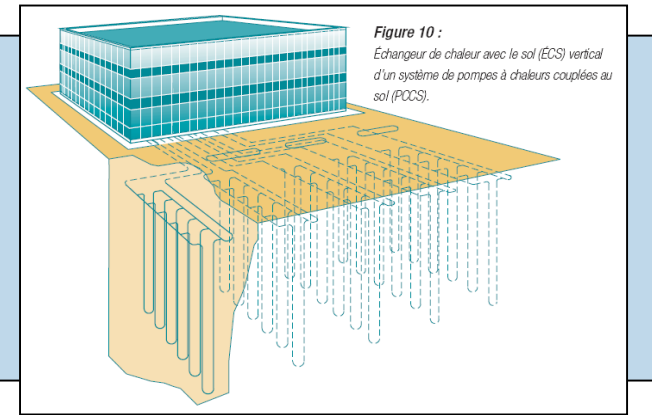
On distingue principalement 3 types de systèmes de géothermie de basse enthalpie utilisant des pompes à chaleur eau-air ou eau-eau.



Boucle ouverte



Puits à colonne

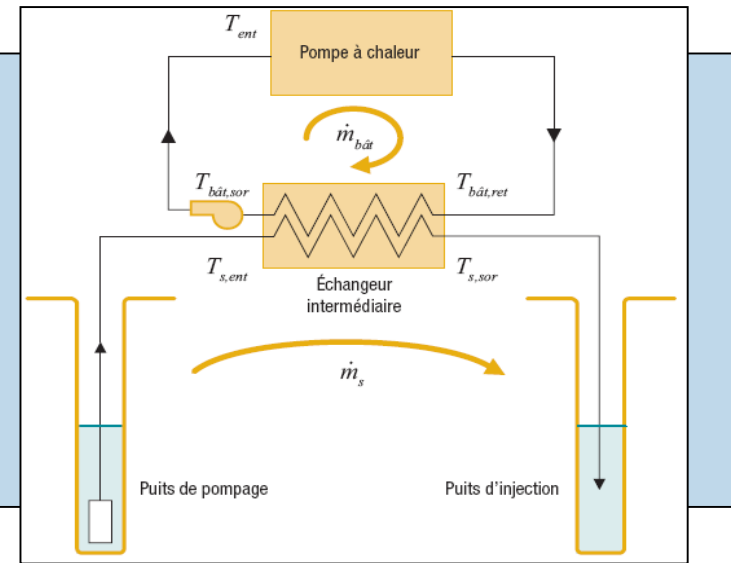
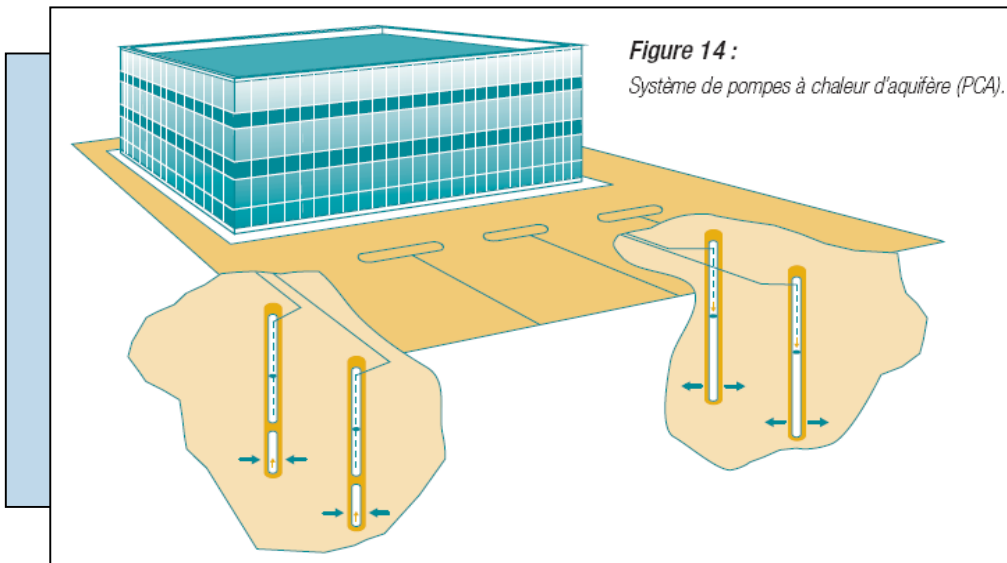


Boucle fermée verticale

Des thermopompes sont requises afin d'échanger de la chaleur entre le bâtiment et les puits géothermiques

## BOUCLE OUVERTE

Circulation directe de l'eau souterraine à travers une thermopompe eau-air et/ou un échangeur de chaleur à plaque (8-10% des installations)<sup>1</sup>



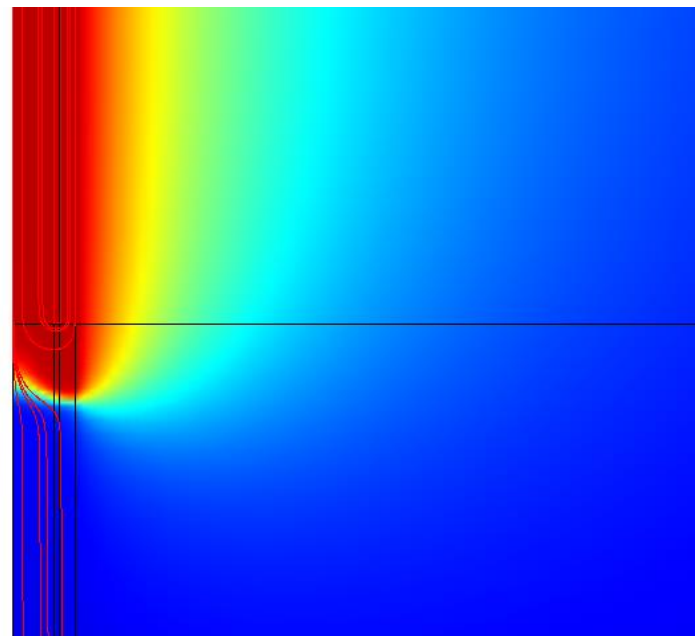
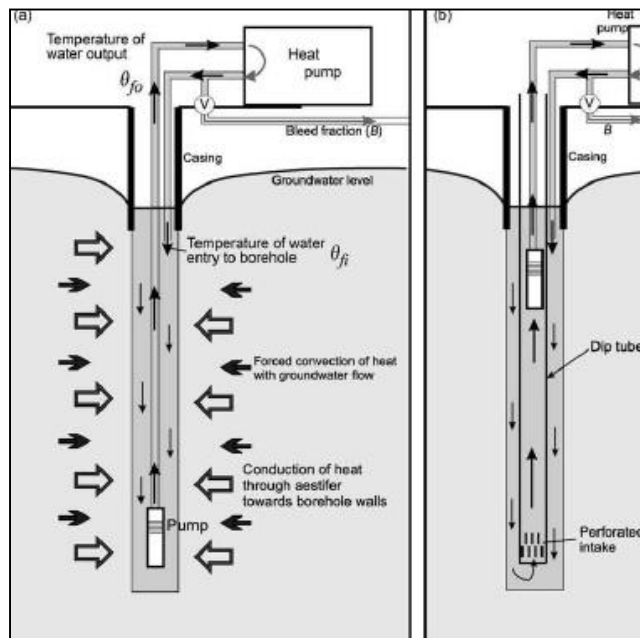
- Requiert de bonnes conditions hydrogéologiques
- La qualité de l'eau est importante (biofilm, entartrage...)
- Coûts de construction moindres que les systèmes en boucle fermée
- Grande efficacité énergétique (COP>4-5)

<sup>1</sup> Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (2007)



## PUITS À COLONNE PERMANENTE

Recirculation de l'eau souterraine dans un puits profond à travers une thermopompe eau-air et/ou un échangeur de chaleur à plaque (<1% des installations)<sup>1</sup>

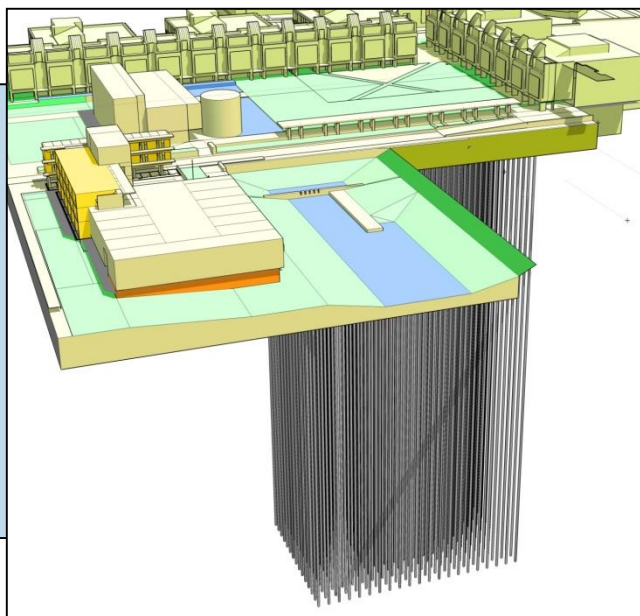


- Ne requiert pas de conditions hydrogéologiques très favorables
- Technologie idéale pour une intégration à un bâtiment existant
- La qualité de l'eau assez importante (biofilm, entartrage...)
- Coûts de construction moindres que les systèmes en boucle fermée
- Grande efficacité énergétique (COP>4-5)

<sup>1</sup> Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (2007)

## BOUCLE FERMÉE VERTICALE

Circulation continue d'un fluide caloporteur à travers une pompe à chaleur et un réseau de puits géothermiques (90% des installations)<sup>1</sup>



- Technologie éprouvée – faible entretien, longue durabilité
- Bonne efficacité énergétique (COP $\approx$  3-4)
- Coûts de construction proportionnels :
  - Charges thermiques du bâtiment
  - Conductivité thermique du milieu géologique

<sup>1</sup> Coalition Canadienne de l'Énergie Géothermique (2007)

# Géothermie de basse température

## BOUCLE FERMÉE IMMERGÉE

Circulation continue d'un fluide caloporteur à travers une pompe à chaleur et un échangeur de chaleur immergé



- Faibles coûts de construction
- Nécessite de faibles courants et une profondeur d'eau importante
- La formation de glace autour de l'échangeur augmente la flottabilité
- Nécessite un certificat d'autorisation

<http://tinyurl.com/chiasson> et

[http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_heat\\_pump](http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_heat_pump)

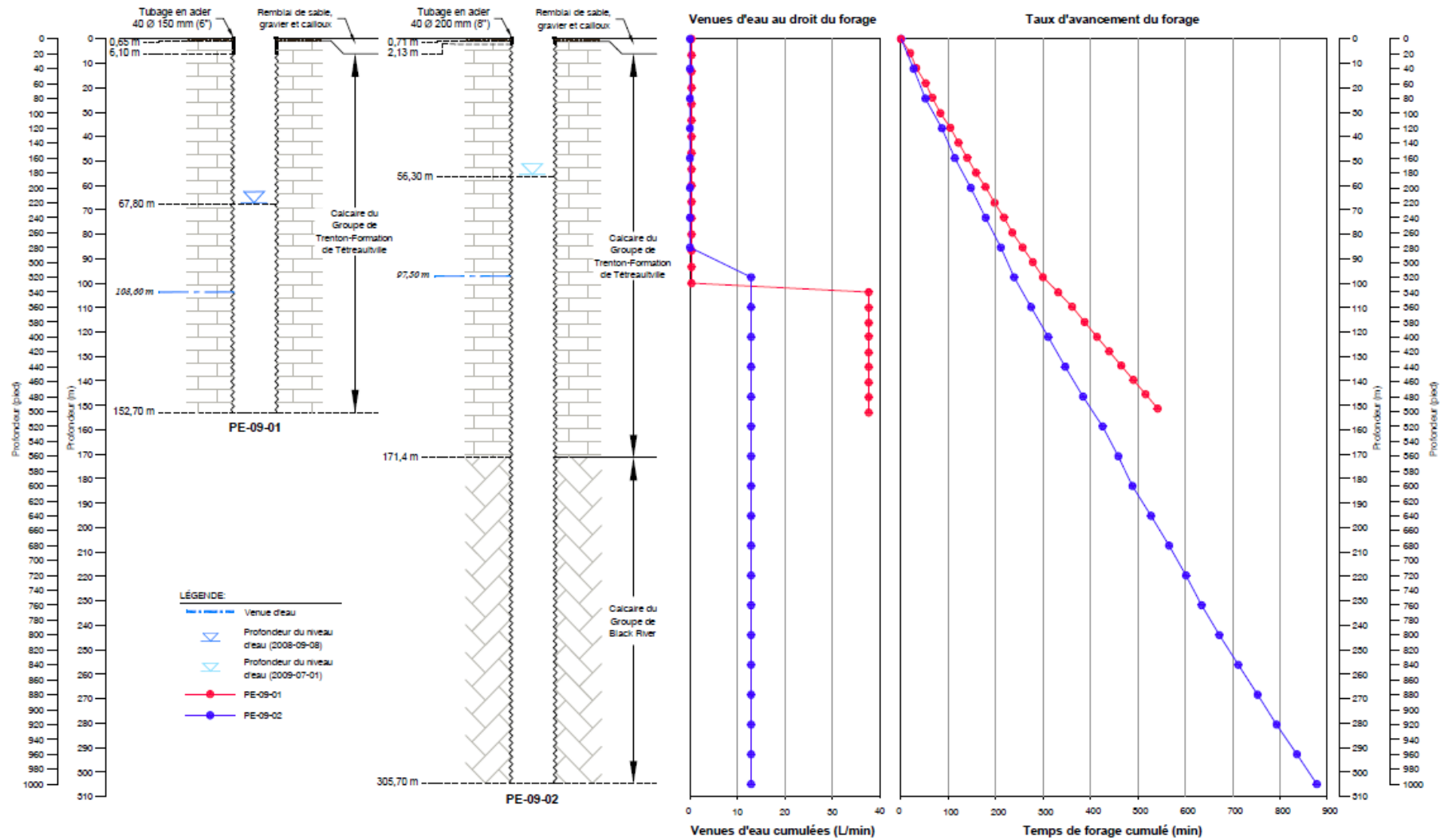
[http://www.awebgeo.com/What\\_is\\_it.html](http://www.awebgeo.com/What_is_it.html)

# Plan de la conférence



- Généralités
- Géothermie de basse température
  - Boucle ouverte
  - Puits à colonne
  - Boucle fermée
- **De l'exploration à la construction**
  - Forage exploratoire
  - Essai de réponse thermique
  - Dimensionnement
  - Construction
- Conclusion et questions

# Forage exploratoire



Source de l'image: P.Pasquier, 2010, Les aspects souterrains de la géothermie, Congrès de l'APPQ, Boucherville, Québec.

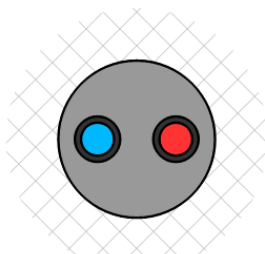
# Un puits géothermique en quelques mots

Les composantes et les dimensions d'un puits sont généralement de l'ordre de:

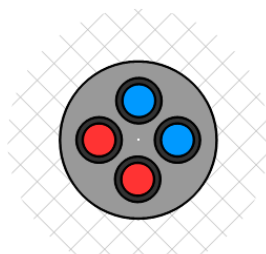
- Profondeur – 100 à 300 m
- Diamètre du forage – 4.75" à 6"

Un coulis imperméable de bentonite est utilisé pour prévenir:

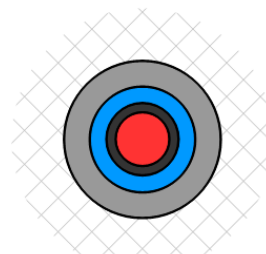
- La contamination des eaux souterraines par un polluant provenant de la surface
- La contamination des eaux souterraines par un polluant provenant d'un autre aquifère
- Les pertes d'eau souterraine pour les aquifères en conditions artésiennes



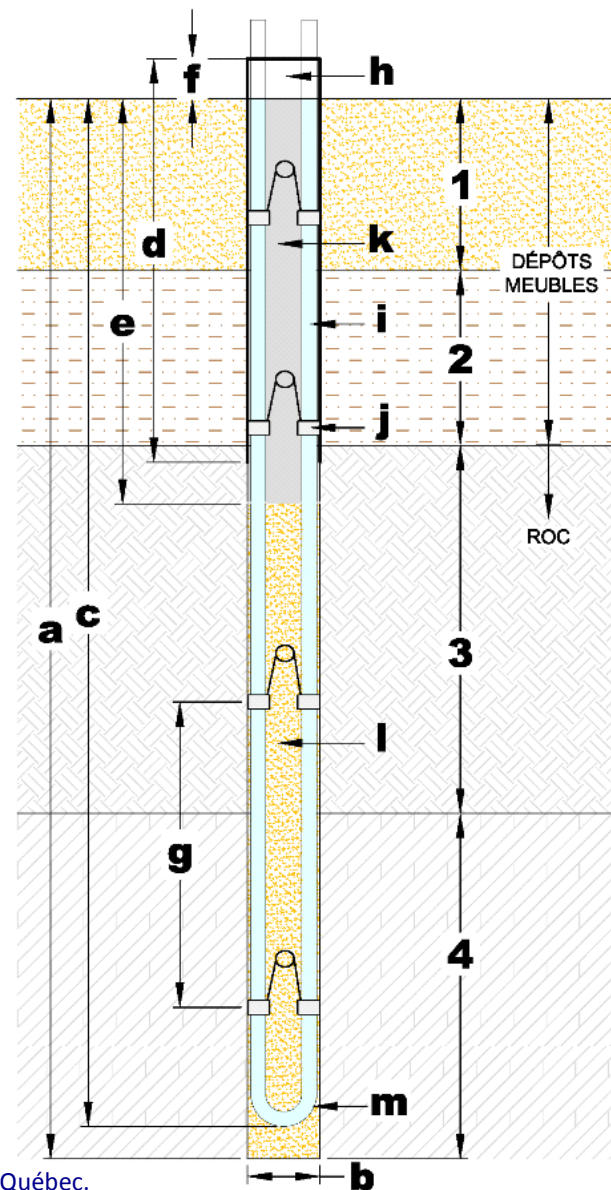
Boucle simple



Boucle double



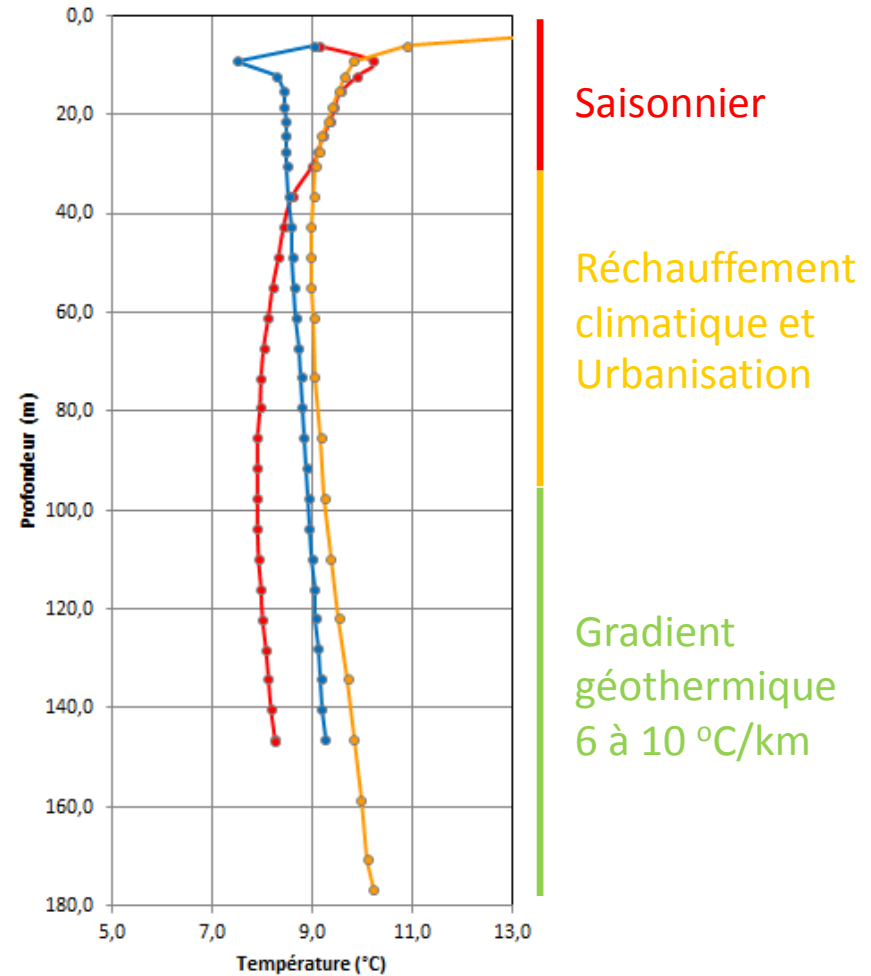
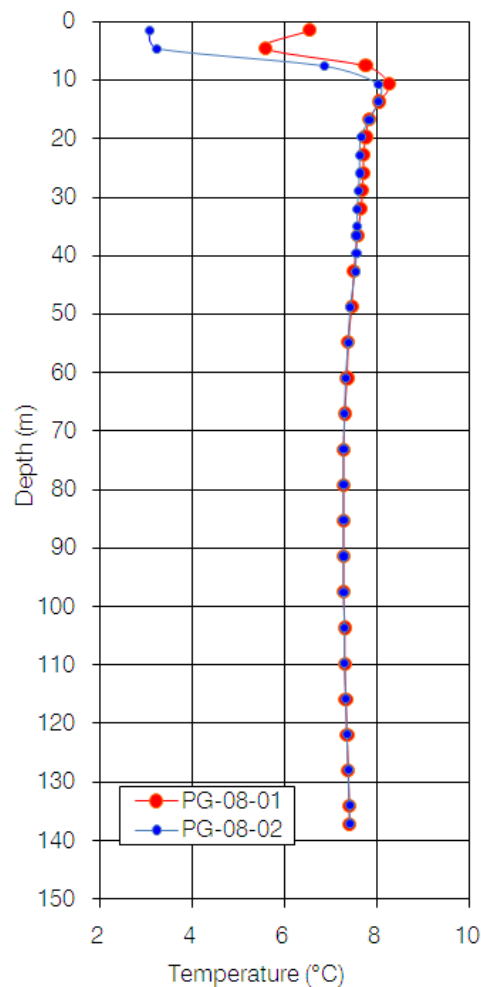
Échangeur coaxial



Source de l'image: P.Pasquier, 2010, Les aspects souterrains de la géothermie, Congrès de l'APPQ, Boucherville, Québec.

# Profil thermique vertical

Le profil thermique permet de déterminer précisément la température du sol ( $T_g$ ), un paramètre nécessaire au dimensionnement d'un système complet.

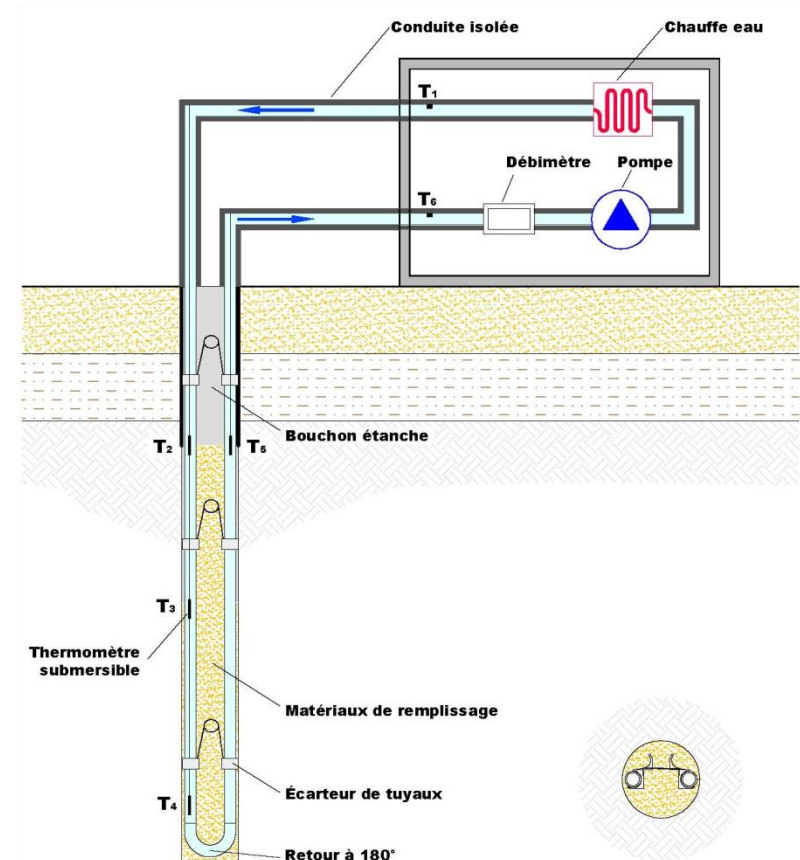
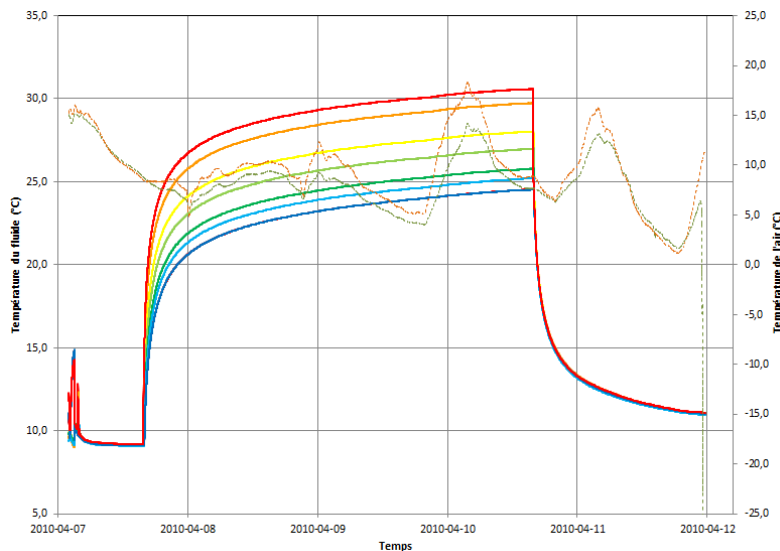


Source des images: P.Pasquier, 2010, Les aspects souterrains de la géothermie, Congrès de l'APPQ, Boucherville, Québec.

# Essai de réponse thermique

Un essai de réponse thermique consiste à transférer de la chaleur à un puits d'essai géothermique et à mesurer la variation de température du fluide. L'essai est réalisé à l'aide d'une unité comprenant différents éléments:

- Éléments chauffant
- Pompe de circulation
- Sondes de température
- Débitmètre
- Transmetteur de puissance de chauffage
- Système d'acquisition de données



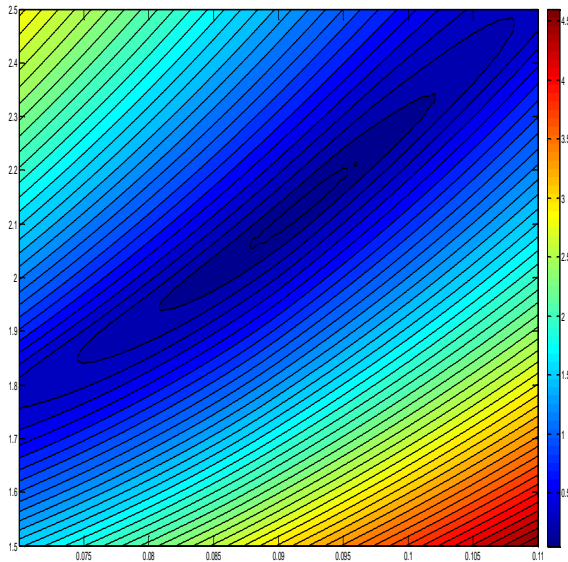


# Essai de réponse thermique

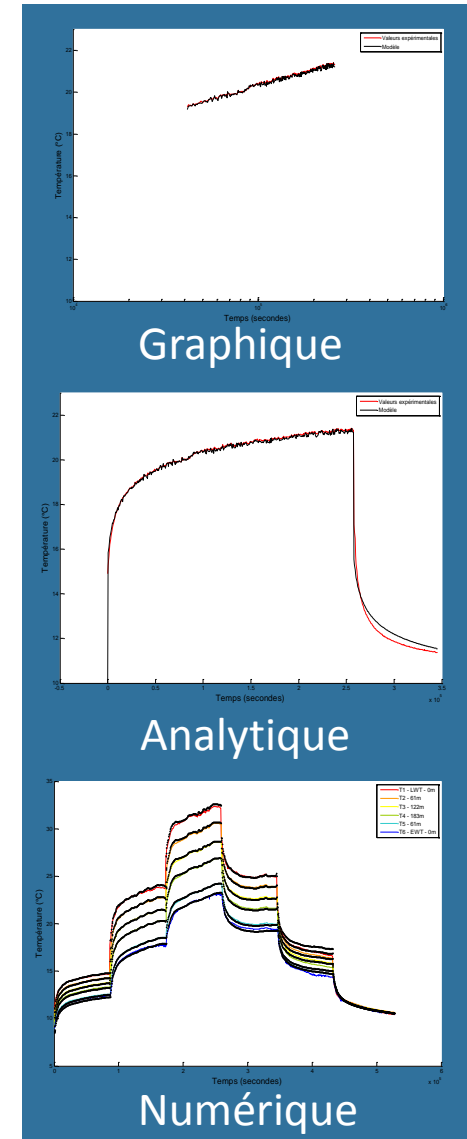
L'interprétation de l'essai consiste à déterminer les paramètres thermiques du milieu géologique ( $k$ ,  $\alpha$ ).

$$\Delta T = \frac{q(t)}{k_{eq}} G(z, p) = \frac{q(t)}{k_{eq}} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} f(\beta) d\beta$$

$$= \frac{q(t)}{k_{eq}} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} (e^{-\beta^2 z} - 1) \frac{J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)}{\beta^2(J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta))} d\beta$$



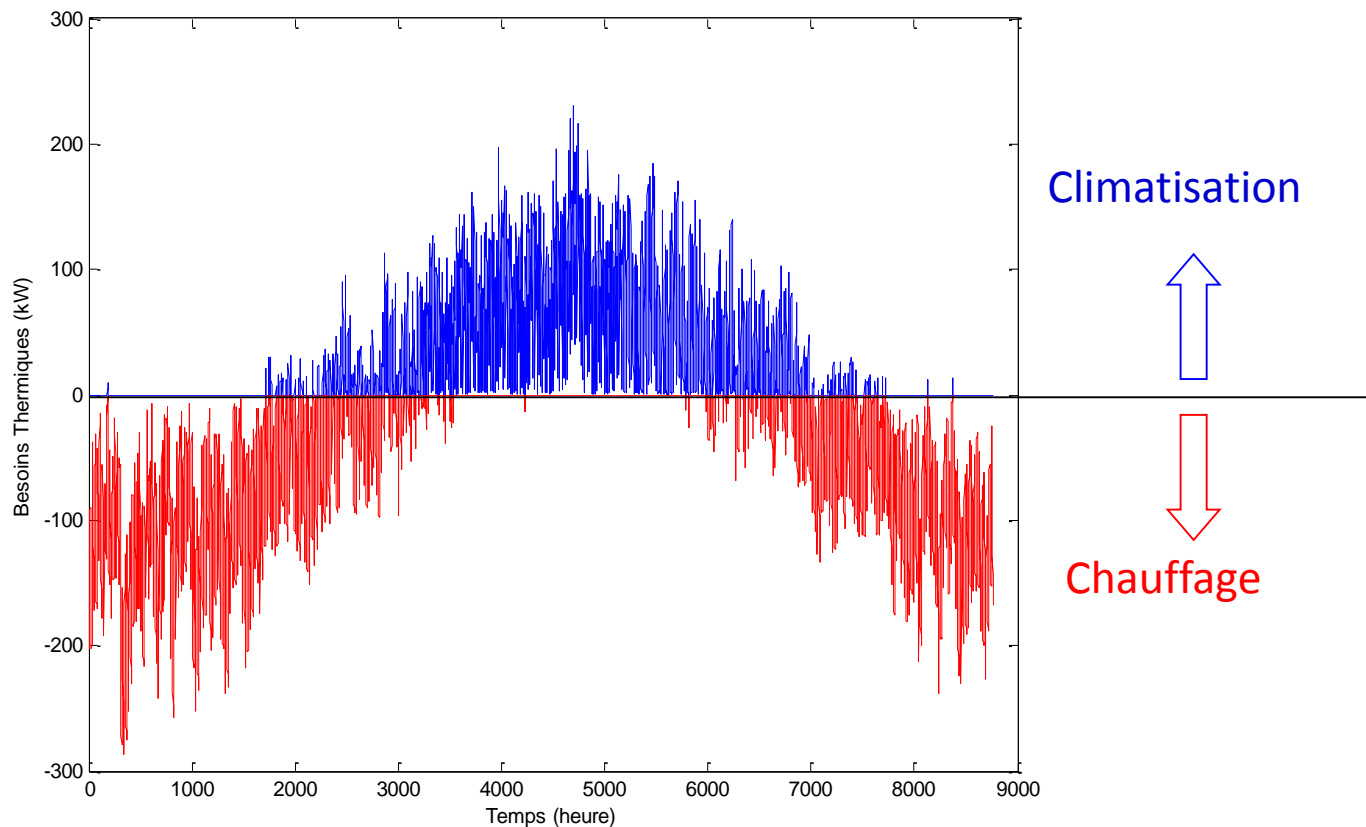
$$\Delta T = \frac{q(t)}{4\pi k_{eq}} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q(t)}{4\pi k_{eq}} E1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$$



# Dimensionnement d'un système

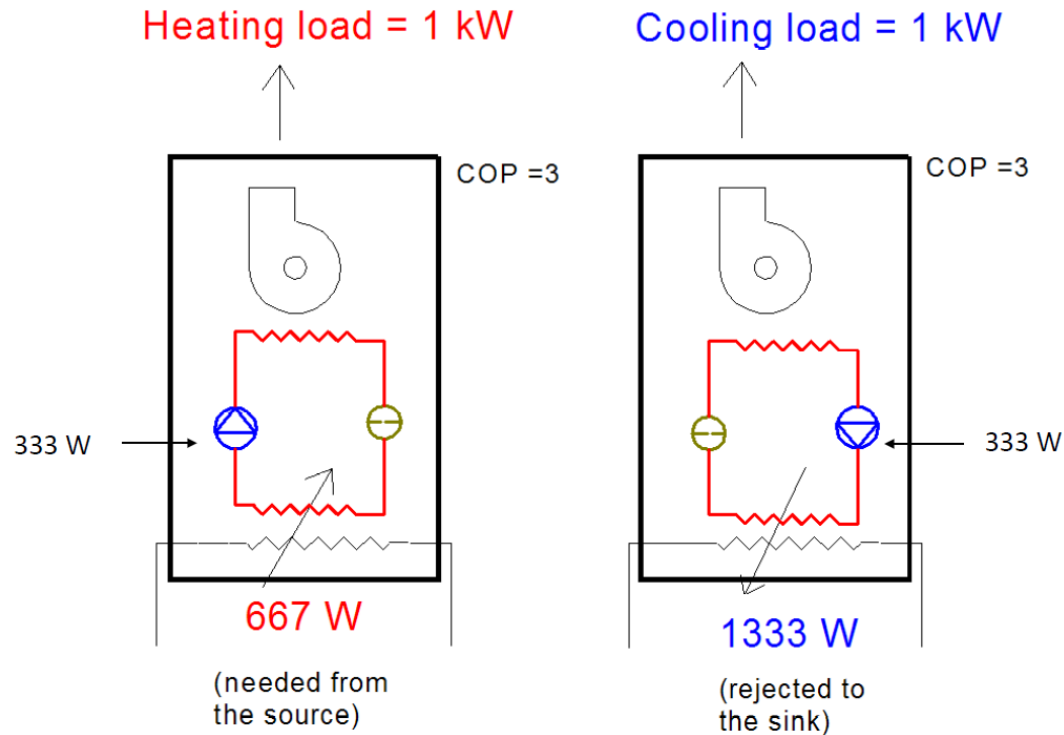
Le dimensionnement d'un champ de géothermie repose sur :

- Besoins thermiques du bâtiment et PAC
- Conductivité thermique du sous-sol



# Thermopompe, COP et charges au sol

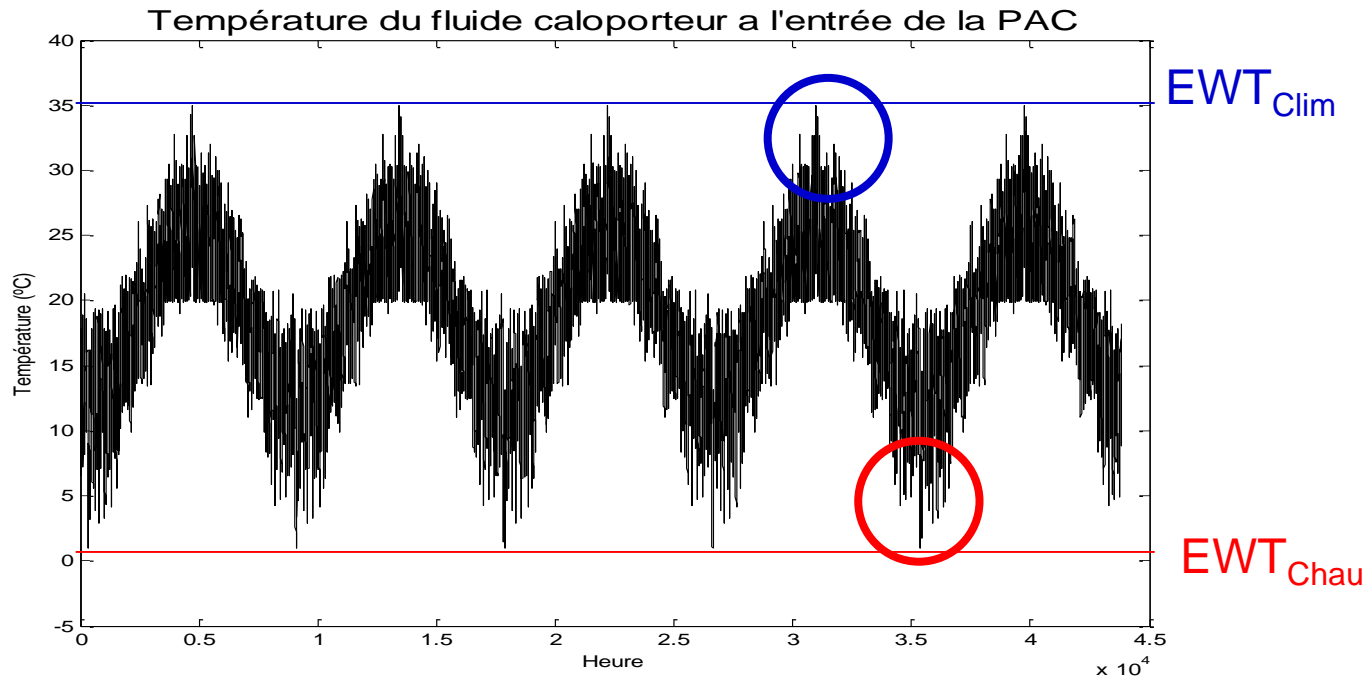
La quantité de chaleur échangée avec le sol est fonction du COP de la thermopompe en chauffage et en climatisation.



Un COP élevé réduira la chaleur extraite du sol en chauffage mais augmentera celle injectée en climatisation.

# Dimensionnement d'un système

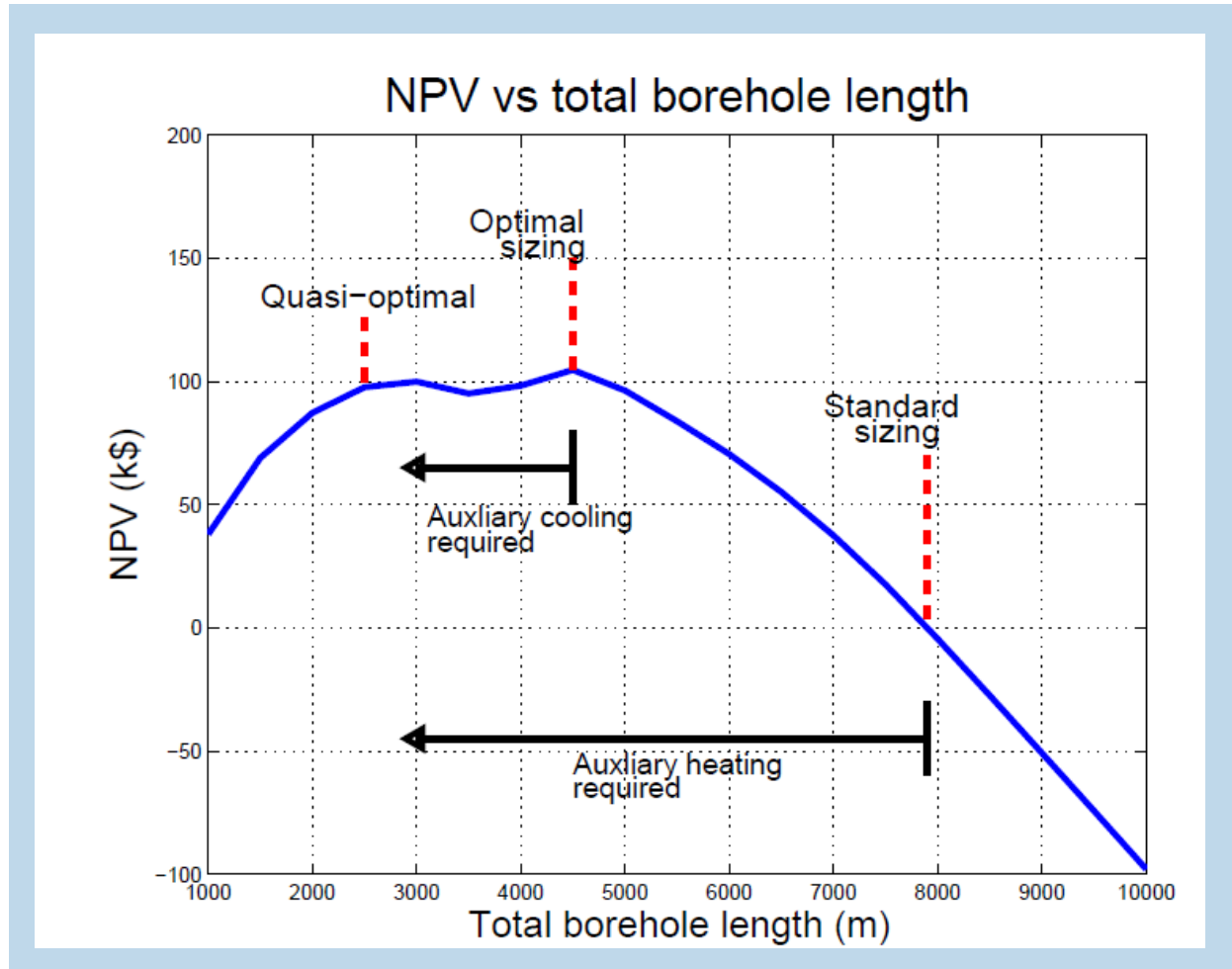
Le dimensionnement d'un système revient à simuler l'évolution temporelle de la température du fluide caloporteur.



Le champ de forages sera dimensionné de façon à ce que la EWT du fluide soit toujours à l'intérieur des limites d'opération de la PAC

# Conception d'un système

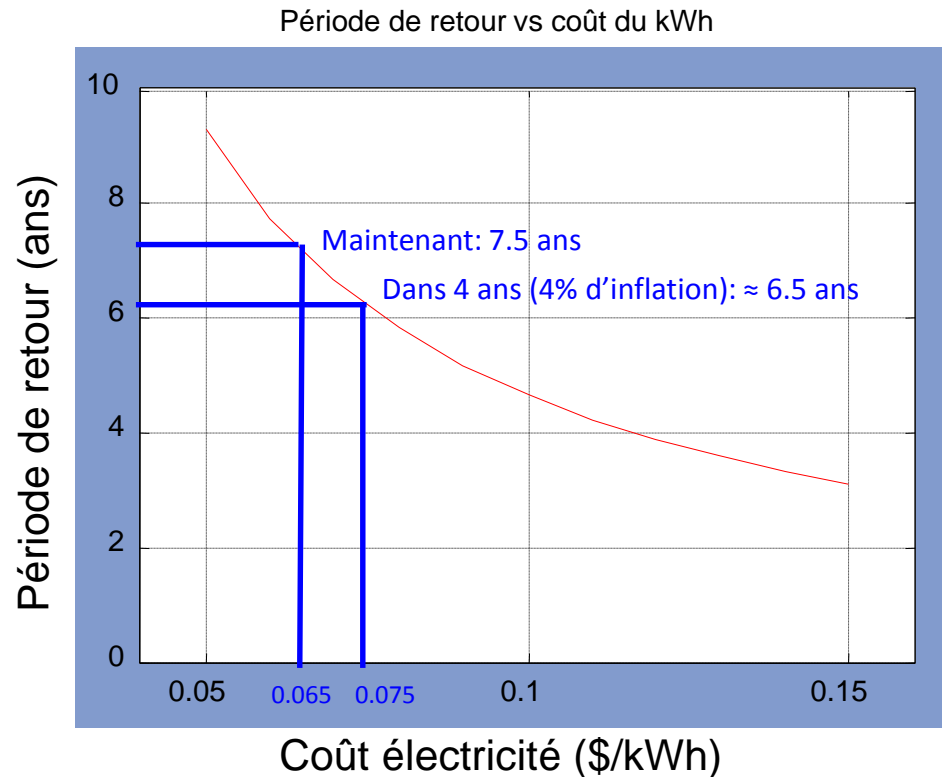
La simulation d'un système hybride permet d'optimiser la valeur actuelle nette (VAN/NPV) d'un projet de géothermie, un indicateur financier.



Source: Marcotte et Pasquier, 2008, Efficient Fluid Temperature Computation

## Facteurs favorables à la géothermie

- Acceptabilité sociale
- Concertation et jumelage des besoins
- Hausse des tarifs de l'électricité et autres énergies



# Construction des composantes souterraines



Source de l'image: P.Pasquier, 2010, Les aspects souterrains de la géothermie, Congrès de l'APPQ, Boucherville, Québec.

# Coûts typiques d'un système

Coûts basés sur une enquête réalisée en 2013 dans la région de Montréal. Les coûts comprennent la fourniture, l'installation et les taxes.

Équipement	Coûts
Puits géothermique	7500 \$/puits
Fluide caloporteur	1,75 \$/L
Tranchée	60 \$/m <sup>3</sup>
Mise en marche des puits	200 \$/puits
Voûte géothermique	1 666 \$/puits
Salle mécanique (premium)	1 250 \$/ton
Thermopompe	2 500 \$/ton
Refroidisseur (auxiliaire)	2 000 \$/ton
Chaudière (auxiliaire)	50 \$/kW

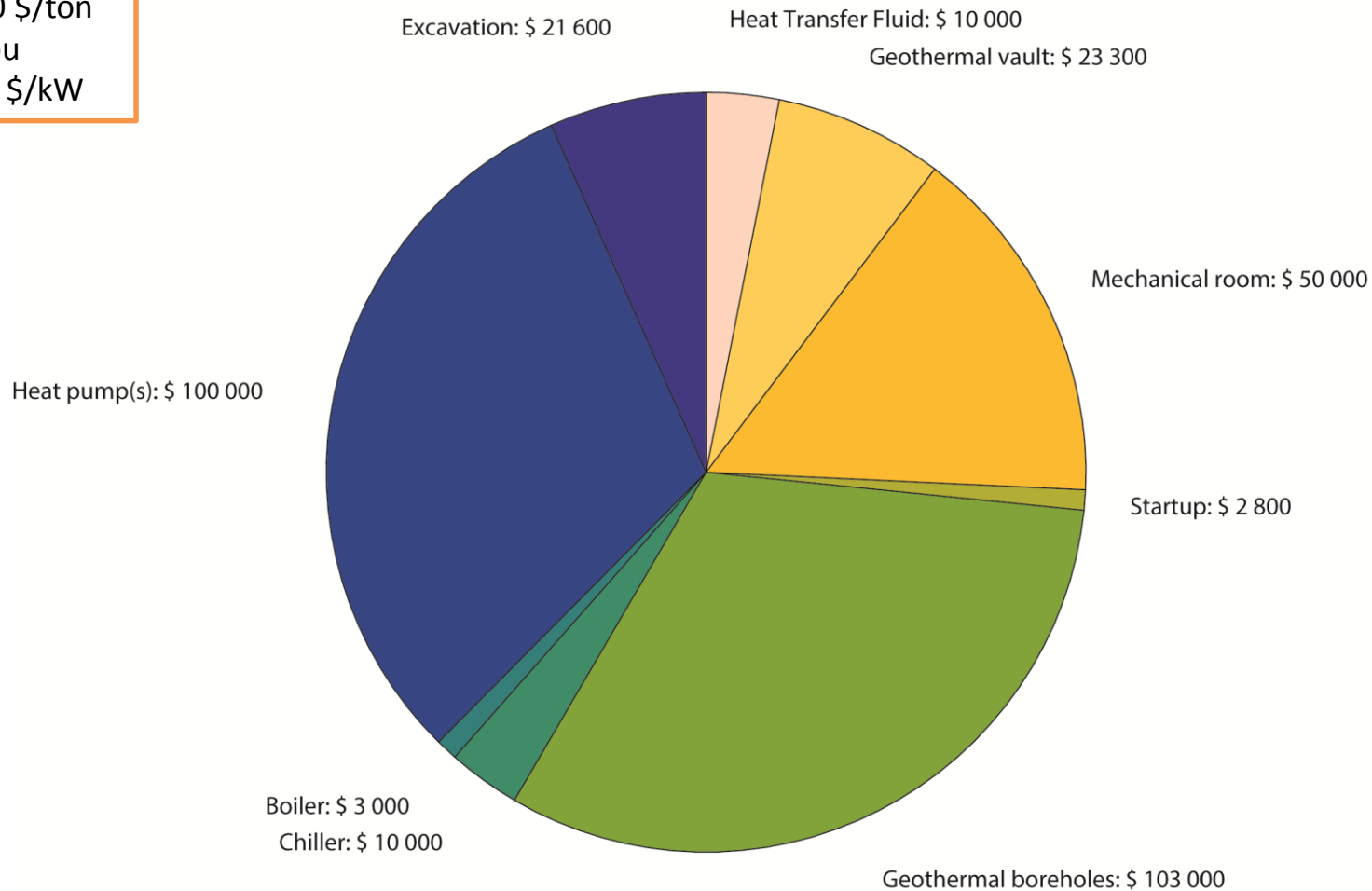






# Coûts typiques d'un système

10 790 \$/ton  
ou  
3 065 \$/kW



# Plan de la conférence



- Généralités
- Géothermie de basse température
  - Boucle ouverte
  - Puits à colonne
  - Boucle fermée
- De l'exploration à la construction
  - Forage exploratoire
  - Essai de réponse thermique
  - Dimensionnement
  - Construction
- **Conclusion et questions**

Questions ?

