



## Axes de recherche

**Valorisation des milieux géologiques favorables**

Étudier les caractéristiques de terrain pour :

- Trouver les sites favorables à l'installation des systèmes
- Déterminer les stratégies à l'aide de simulations

Condiçions de chaleur dans la croûte terrestre

$$Q = \frac{Q_{\text{chaleur}}}{T_{\text{chaleur}}}$$

- **Énergie géothermique** → trouver les sites favorables pour avoir une augmentation de la température
- **Fonction à chaleur** → trouver les sites favorables pour avoir un transfert de chaleur

**Amélioration des méthodes de conception et d'opération des systèmes**

- Augmenter l'efficacité et la durabilité des systèmes en perfectionnant les aspects de **économie** et de **qualité**
- **Cycle de conception de chaleur** → efficacité faible (10-15% @ 110°C)
- **Taux d'investissement de chaleur** du circuit souterrain également bas
- **Pomper à chaleur** → efficacité élevée (COP > 3), mais besoin d'améliorer les méthodes de **conception** des **Infrastructures de chaleur**

$$COP = \frac{Q}{W}$$

**Développement de nouvelles technologies**

- Identifier et avancer le stade de **matériau de nouvelle technologie** pour **augmenter l'efficacité** et de **réduire le coût d'installation** des systèmes
- Développer la **progrès technologique** face aux **produits et aux appareils**

# La géothermie au Canada : problématiques et opportunités de recherche

# Profil

**INRS**

Université d'avant-garde

**Postdoctorat** – Géothermie profonde (2013-2015)

- Caractérisation thermique des Basses-terres du Saint-Laurent –

**ÉTS**

Le génie pour l'industrie



**Postdoctorat** – Thermique (2011-2013)

- Essais de conductivité thermique en forage –  
Bourse BP

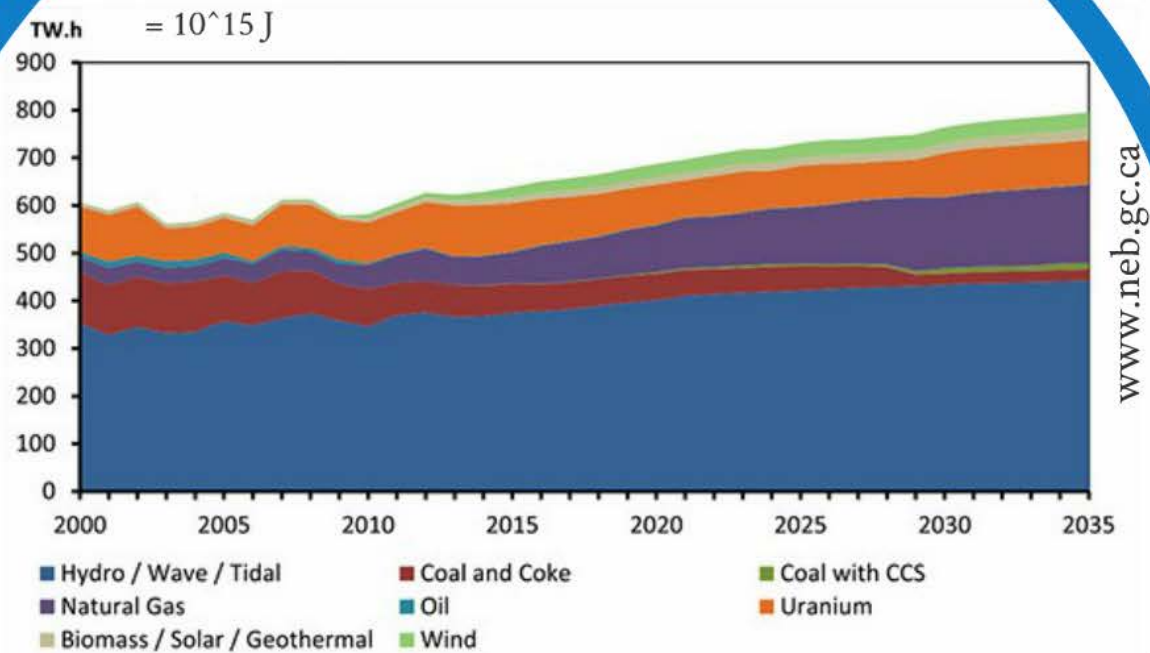


**Ph.D.** – Hydrogéologie (2006-2010)

- Énergie géothermique et environnement minier – Bourse AGB

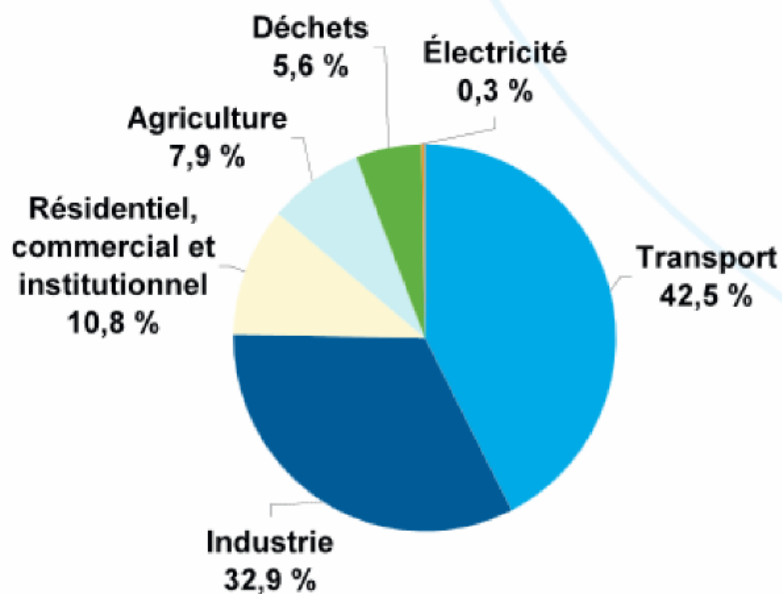


# Tendance énergétique canadienne



- Augmentation des besoins
- Croissance : gaz naturel, énergies renouvelables, hydro-électricité, charbon avec séquestration CO<sub>2</sub>
  - Diminution : charbon, pétrole
    - Moteur de changement – réduction des émissions de GES

# GES



**Figure 1** [www.mddefp.gouv.qc.ca](http://www.mddefp.gouv.qc.ca)  
**Répartition des émissions de GES au Québec, en 2010, par secteur d'activité**

- Les GES au Québec : **transports**, **industrie** et **RCI** (chauffage des bâtiments)
- L'objectif **2020** de réduction des GES - **20%** par rapport à 1990
- Solution : **électrifier les transports** (25% des nouveaux véhicules vendus d'ici 2020)







Québec  
roule à  
la puissance  
verte!



Eastmain - [www.hydroquebec.com](http://www.hydroquebec.com)

## D'où proviendra l'énergie (**verte**) nécessaire pour atteindre ces objectifs?



Murdochville -  
[www.hydroquebec.com](http://www.hydroquebec.com)

- L'hydro-électricité
- L'énergie éolienne
- La géothermie, une des alternatives
- Besoin d'y penser maintenant :
  - ±40 ans pour développer l'éolien au Québec
    - 1977 - Îles-de-la-Madelaine (démonstration)
    - 2015 - 4 000 MW (opération)
  - ±20 ans pour les premiers projets commerciaux de géothermie profonde en Europe
    - 1984 - Soultz (démonstration)
    - 2004 - Landau (opération)



[www.geo-exchange.ca](http://www.geo-exchange.ca)



## Soultz, Fr



Projet de **démonstration**  
(1,5 MW)

**1984** - Début recherche

**2001 - 2005** - Forage

**2004 - 2009** - Construction  
centrale

**2010 - 2013** - Opération  
et monitoring

## Landau, Al



Projet **commercial**  
(2,9 MW)

**2004** - Début construction

**2008** - Production  
d'électricité

## Insheim, Al



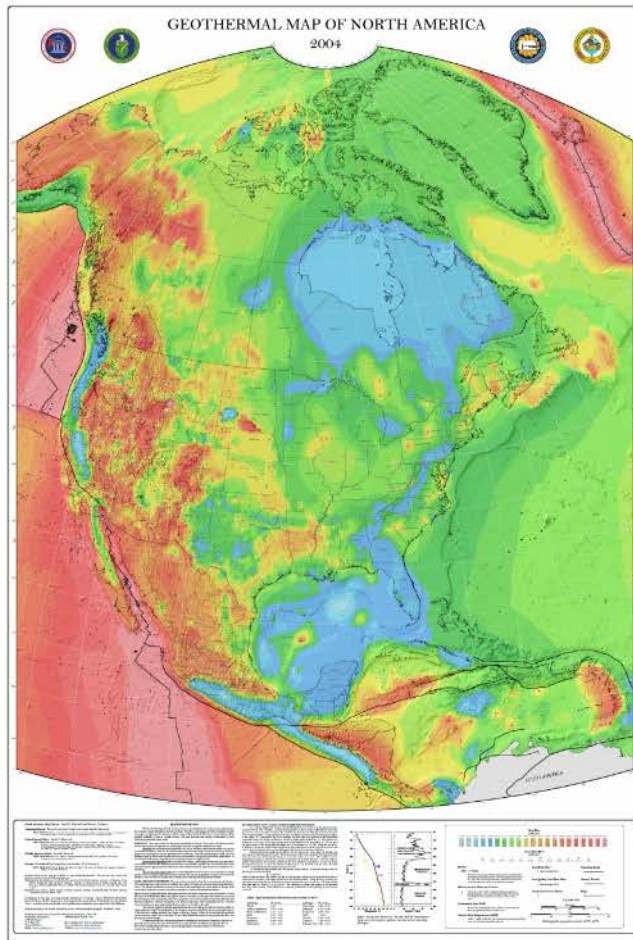
Projet **commercial**  
(4,8 MW)

**2008** - Début construction

**2012** - Production  
d'électricité



# L'énergie géothermique

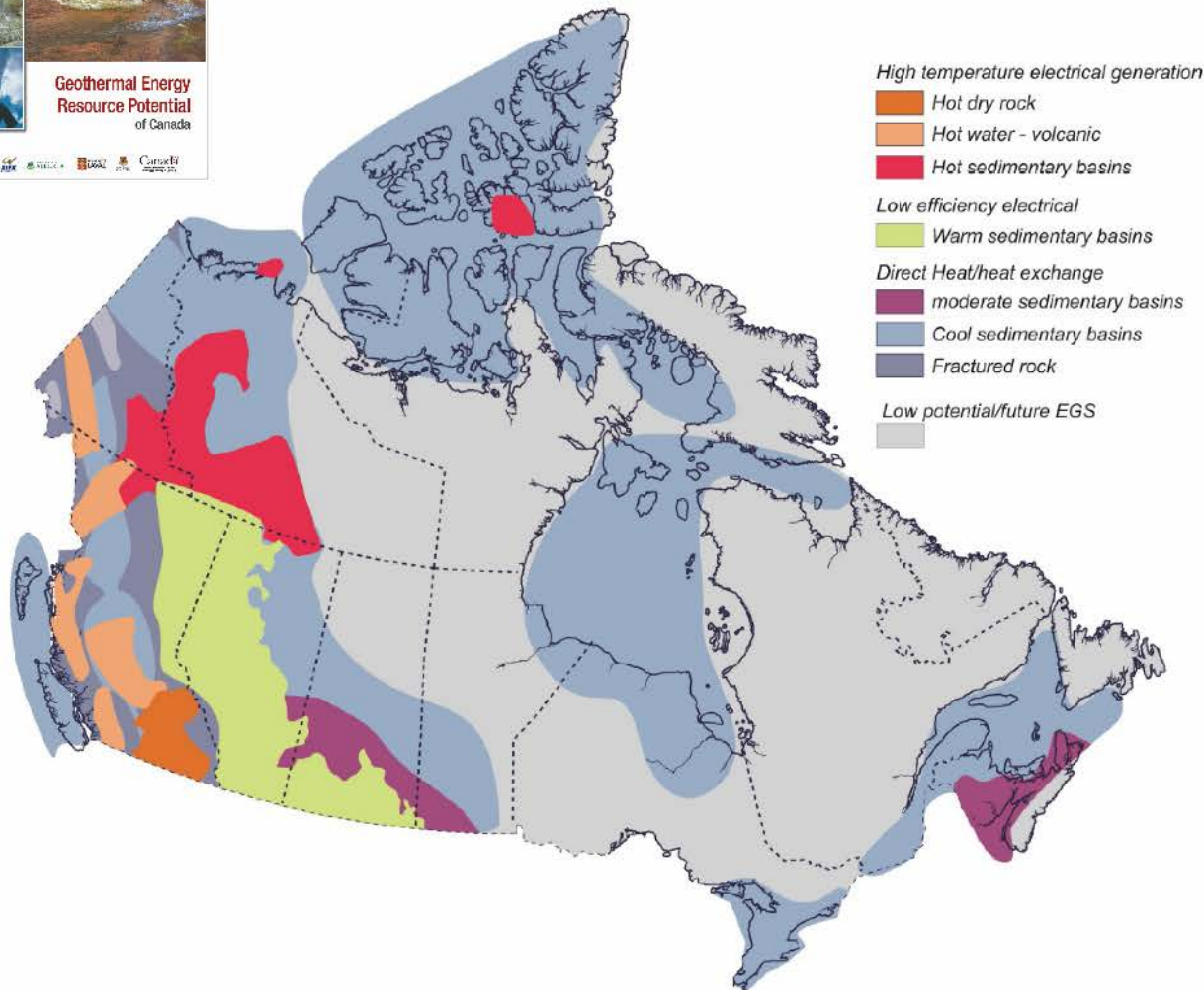
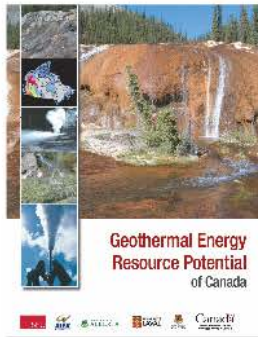


- **Chaleur stockée** dans la croûte terrestre
- Renouvelée par le flux de chaleur terrestre (moyenne  $62 \text{ mW/m}^2$ )
- Principales utilisations :
  - Produire de l'**électricité** --> réservoir chaud ( $80 - 300^\circ\text{C}$ )
  - Économiser de l'énergie lors du **chauffage** et la **climatisation** --> réservoir froid ( $-10 - 30^\circ\text{C}$ )



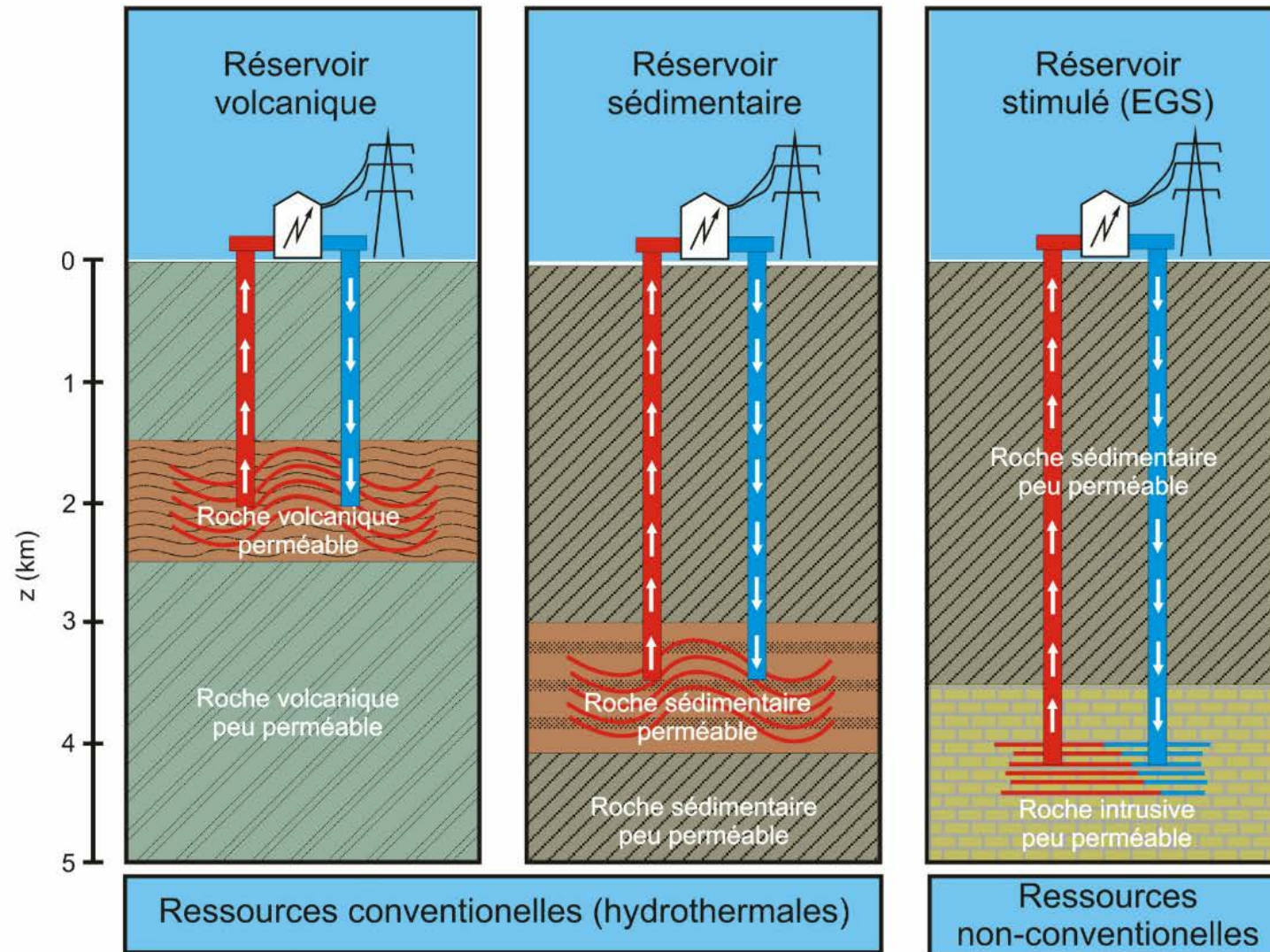
# Les ressources géothermiques au Canada

(Grasby et coll., 2011)





# La production d'électricité géothermique



# L'industrie canadienne

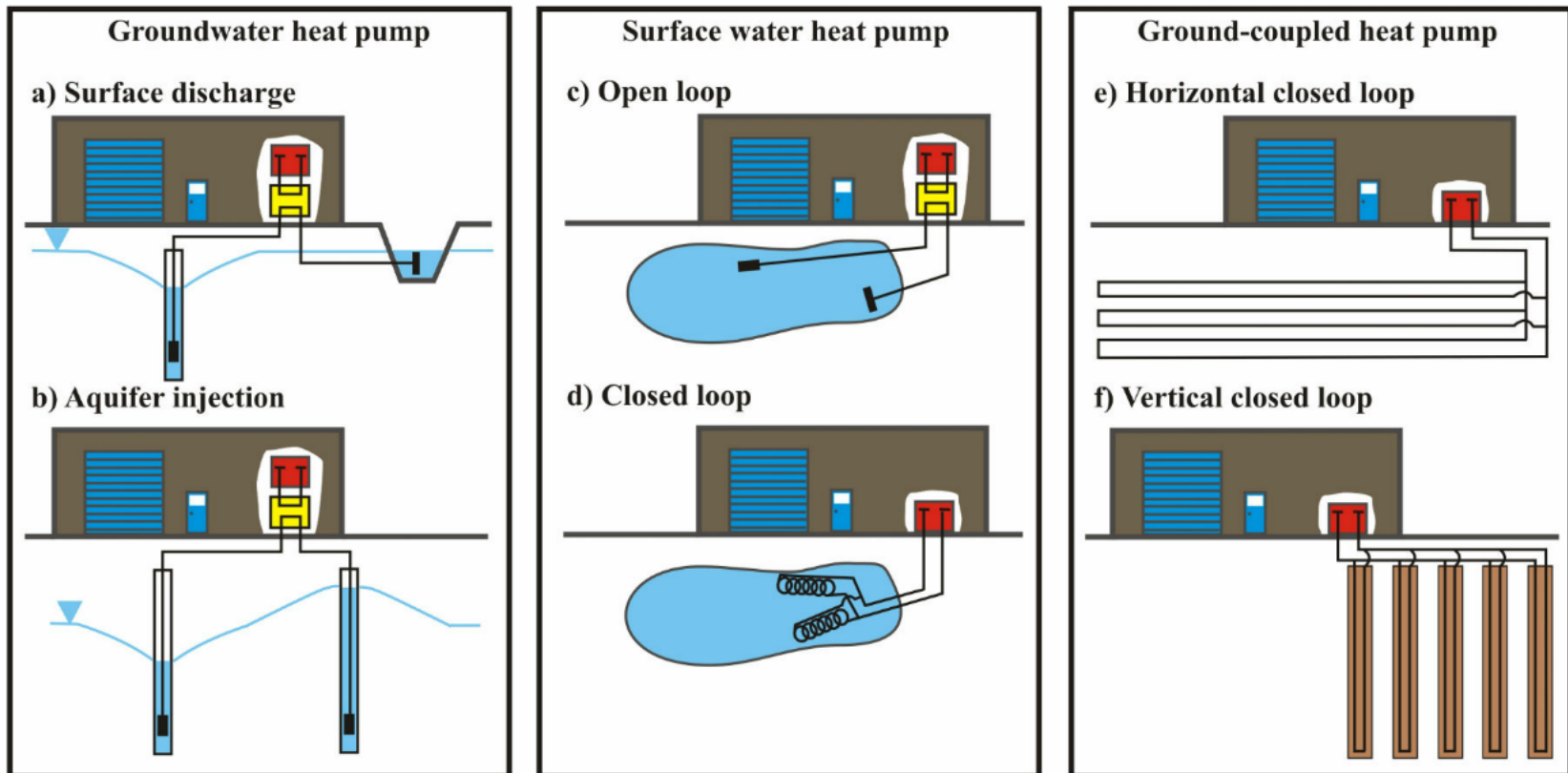
- Aucune centrale en opération
- Quelques [projets d'exploration](#) :
  - Volcanique : Canoe Reach, Lillooet, Meager Creak (CB)
  - Sédimentaire : Ft. Liard (TNW), Swan Hills (AB), Rafferty (SK)
- [CanGEA](#) : ± 15 membres (développement des ressources, services)



www.cangea.ca



# Le chauffage et la climatisation géothermique



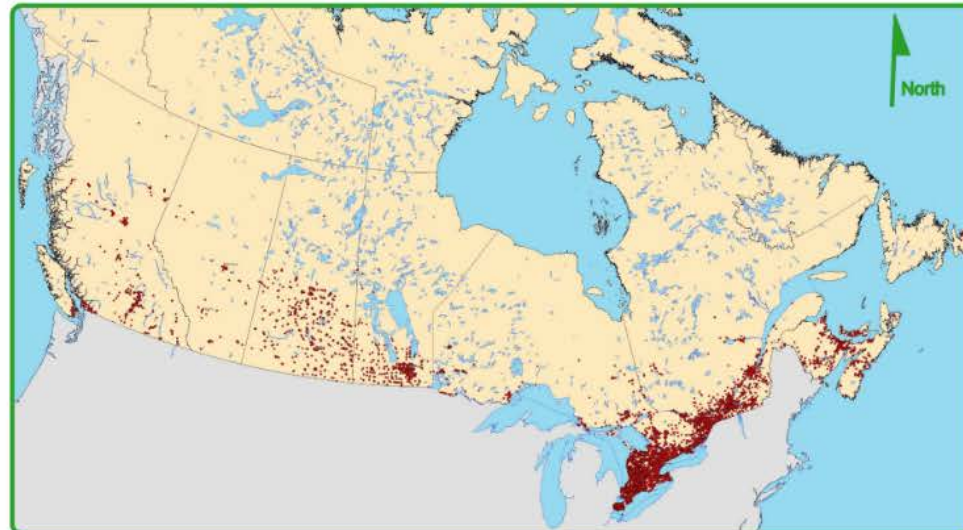
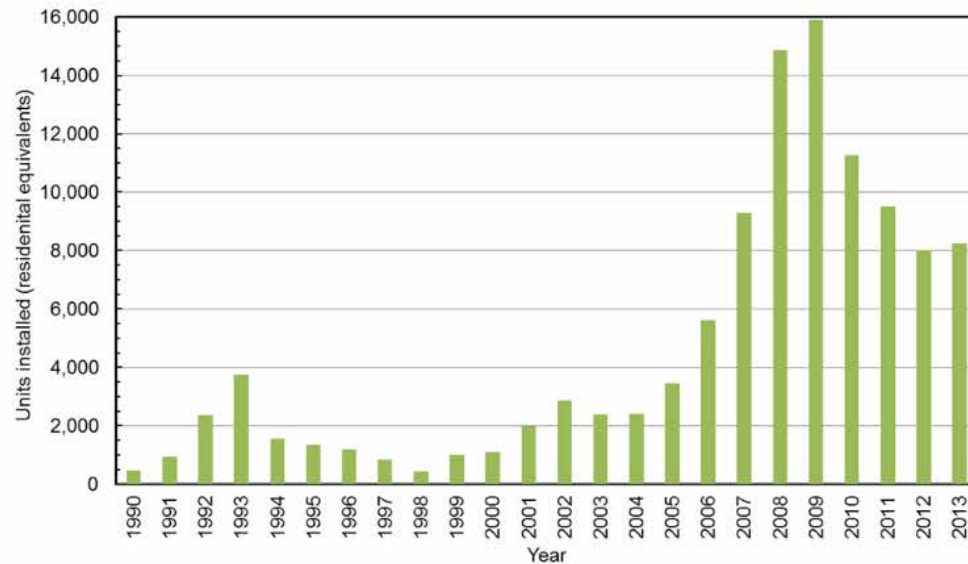
(Raymond et coll., 2010)





# L'industrie canadienne

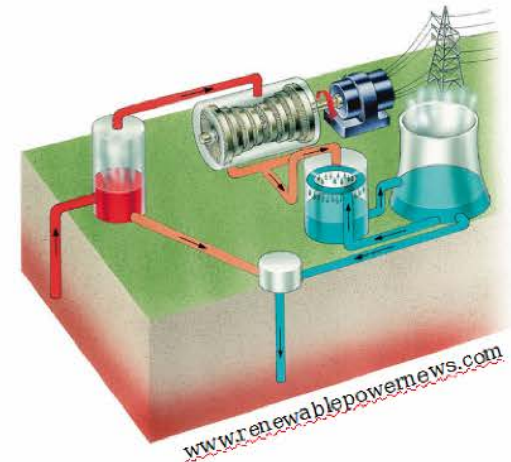
- Jusqu'à ~ 16 000 unités installées par année
- Forte croissance – 40 à 60 %/an (2004 à 2008)
- Taille du marché : Ontario > Québec > Colombie-Britannique
- CCÉG : ± 250 membres (conception, installation, opération, fabrication)



(Raymond et coll., 2015; CCÉG)

## Les avantages

- Énergie **renouvelable**
- Production **continue**
- **Faible émission** de GES
- Utilisation d'un territoire **restreint**



## La problématique

- **Coût** d'installation **élevé** à cause des forages

## Objectif de la recherche

- Réduire le coût d'installation pour favoriser l'émergence de la filière





## Axes de recherche

**Valorisation des milieux géologiques existants**

Évaluer les caractéristiques du terrain pour :

- Trouver les zones favorables à l'installation des systèmes
- Déterminer les avantages à l'aide de simulations

Conductivité de chaleur dans la croûte terrestre

$$k = \frac{1}{\rho C_p} \frac{dT}{dz}$$

• Trouver les «Zones chaudes» → trouver les zones riches pour augmenter l'efficacité de la température.

• Pompes à chaleur → trouver les profils qualitatifs pour trouver un meilleur de chaleur.

**Amélioration des méthodes de conception et d'application des systèmes**

- Augmenter l'efficacité et la rentabilité des systèmes en perfectionnant les phases de conception et d'application
- Cycle de conception de chaleur → efficacité faible (18 à 21°C)
- Taux d'extraction de chaleur de réservoirs souterrains également bas
- Pompes à chaleur → efficacité élevée (COP > 5), mais besoins d'améliorer les méthodes de conception des technologies de chaleur

$$COP = \frac{Q_c}{W}$$

**Développement de nouvelles technologies**

- Inventer et prouver le stade de maturité de nouvelles technologies pour augmenter l'efficacité et de réduire le coût d'installation des systèmes
- Développer le processus manufacturier des nouveaux produits et leur application

# La géothermie au Canada : problématiques et opportunités de recherche



# Valorisation des *milieux* géologiques favorables

Évaluer les caractéristiques du sous-sol pour :

- Trouver les **endroits favorables** à l'installation des systèmes
- Démontrer les **avantages** à l'aide de simulations

Conduction de chaleur dans la croûte terrestre

$$q_i = -\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

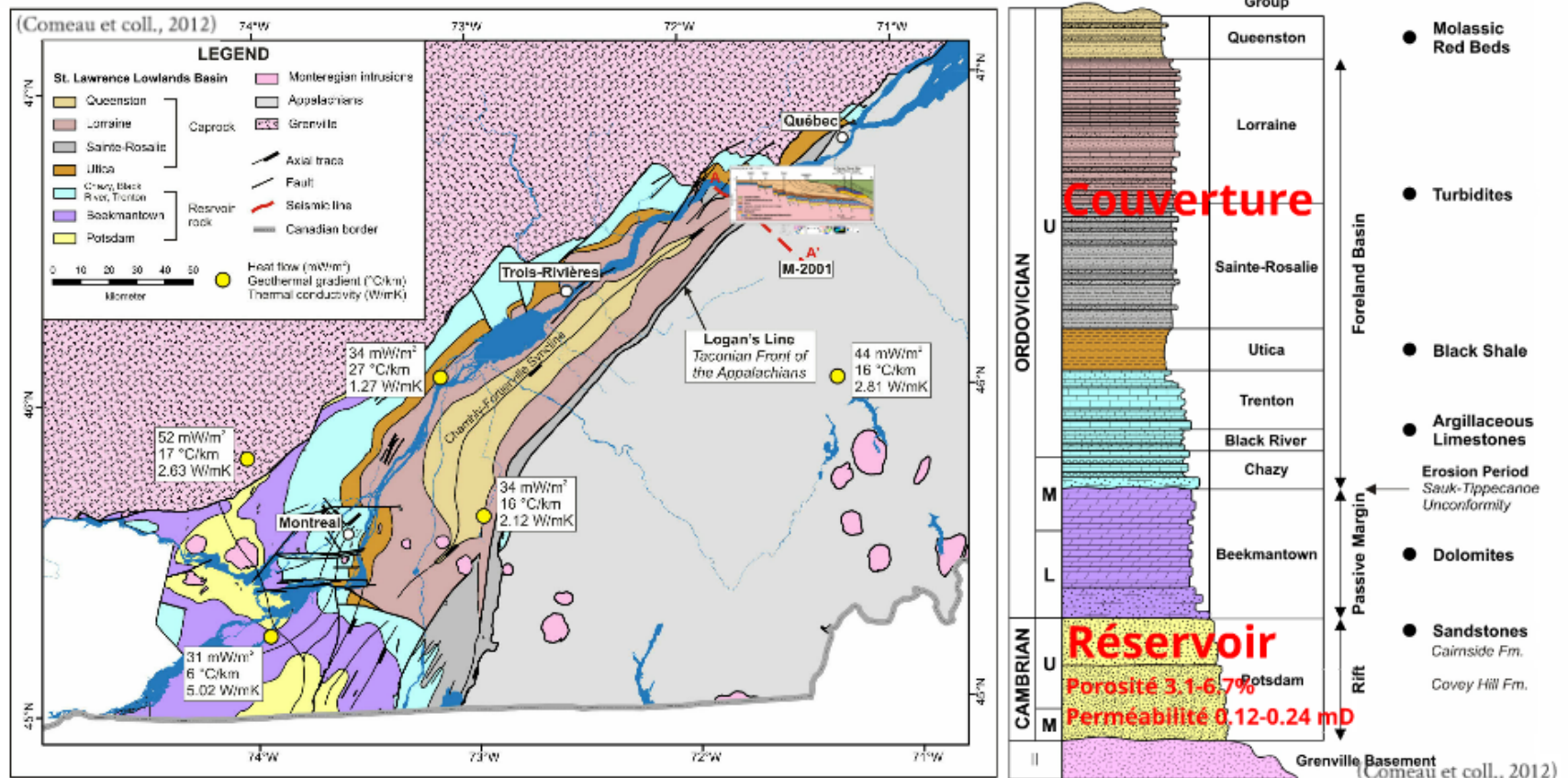
- **Réservoir sédimentaire** --> trouver les **roches isolantes** pour assurer une augmentation de la température
- **Pompes à chaleur** --> trouver les **roches conductrices** pour assurer un transfert de chaleur



# Évaluation du potentiel géothermique des Basses-terres du Saint-Laurent

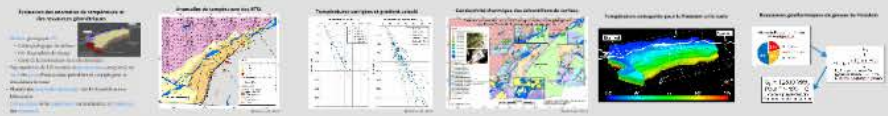
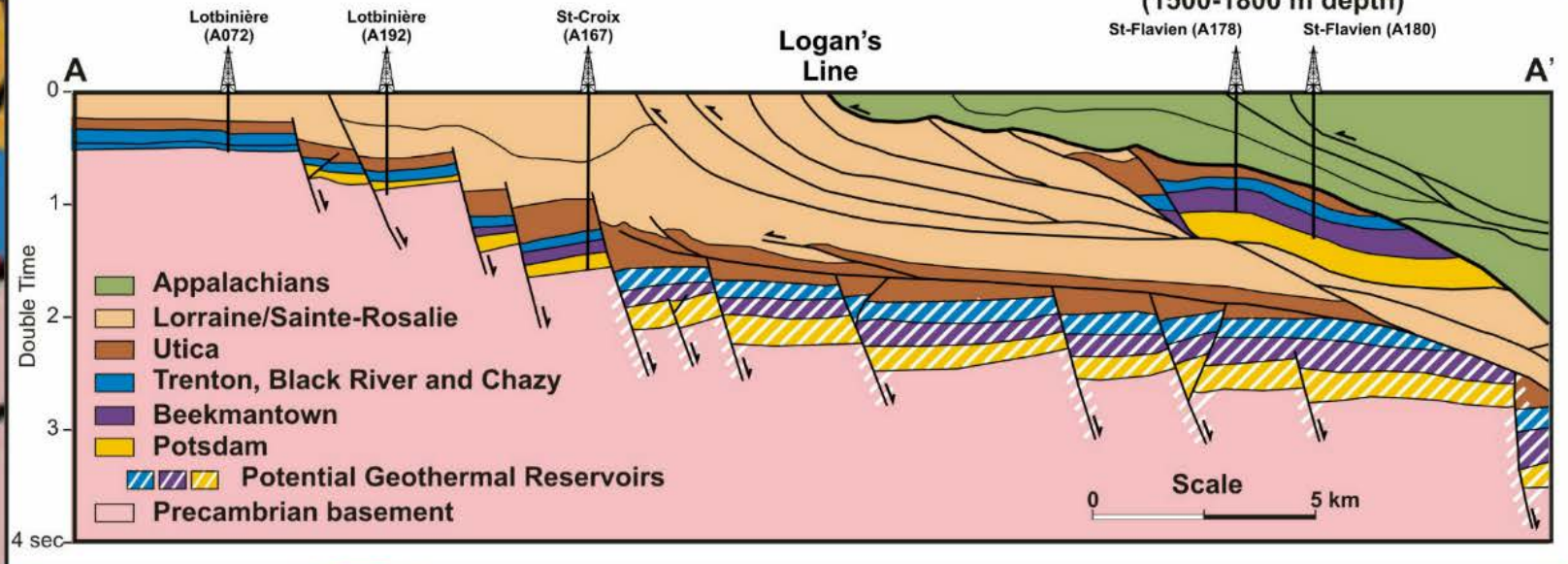


- Travaux réalisés avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec
- Ressources de basse à moyenne température (80-200 °C)



(Castonguay et coll., 2010)

### St-Flavien Thrust Slice (1500-1800 m depth)

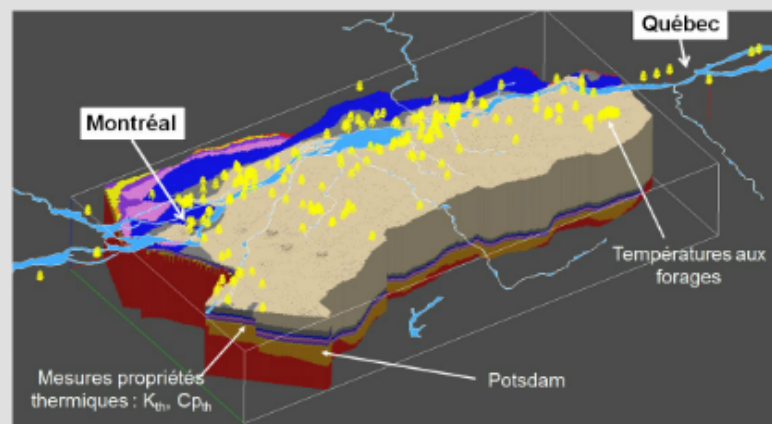


**M-2001**

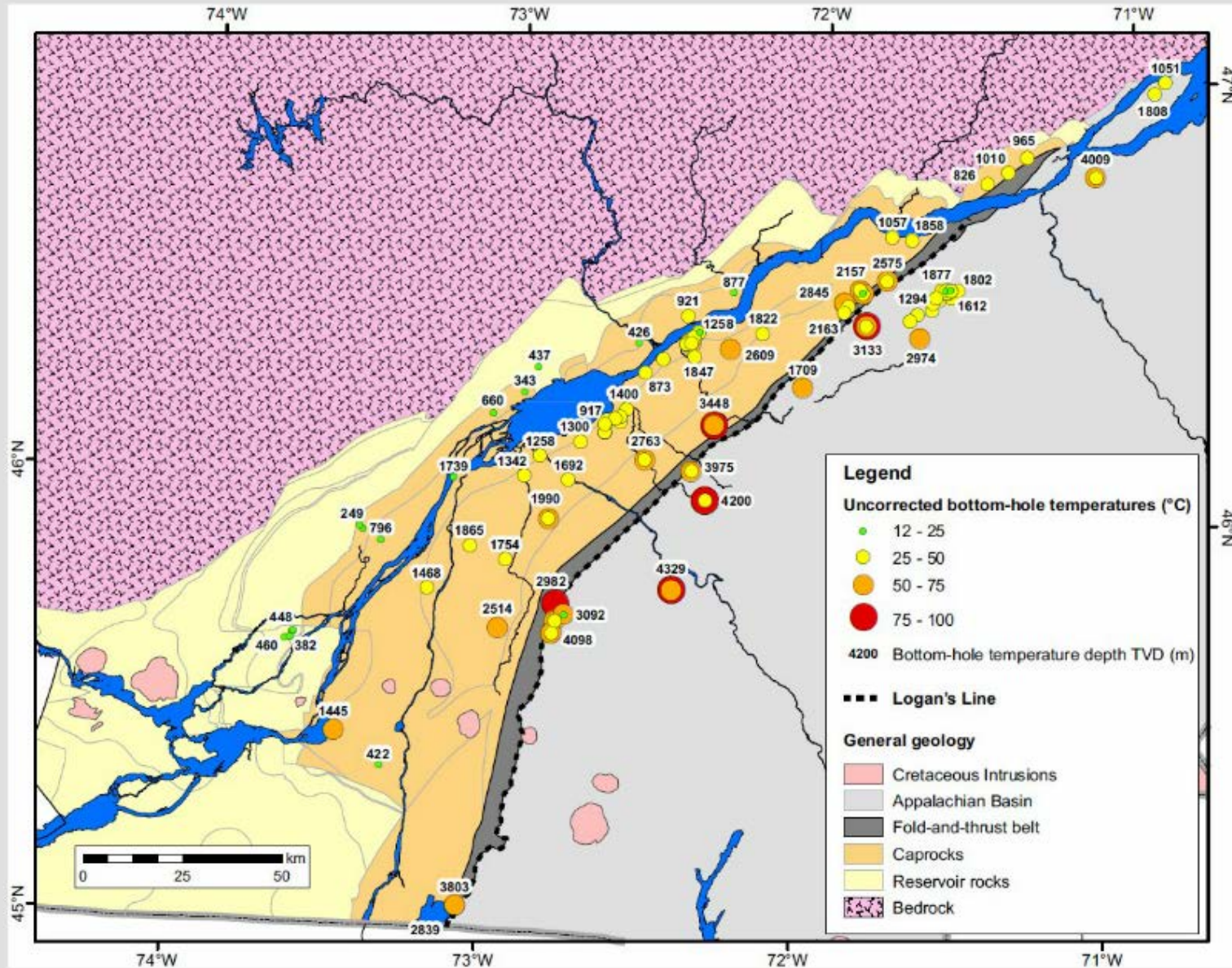


# Évaluation des anomalies de température et des ressources géométriques

- **Modèle** géologique 3D
  - Carte géologique de surface
  - 164 diagraphies de forage
  - Carte de la profondeur du socle (sismique)
- Superposition de 125 mesures de **température** enregistrée au **fond** des **puits** d'exploration pétrolière et corrigée pour la circulation de boue
- Mesure des **propriétés thermiques** sur 45 échantillons en laboratoire
- **Extrapolation** de la **température** en profondeur et **évaluation** des **ressources**

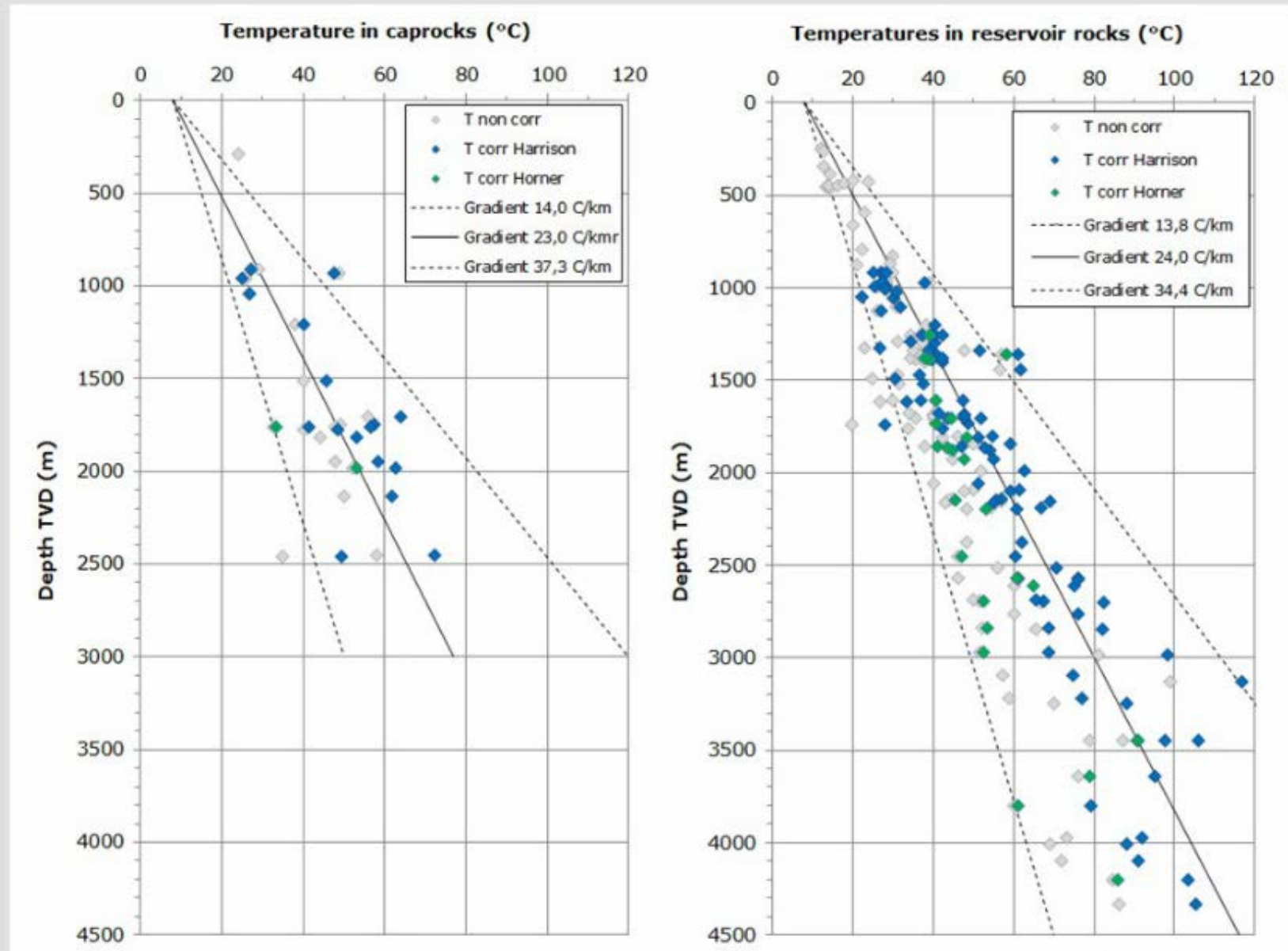


# Anomalies de température des BTSL



(Bédard et coll., 2014)

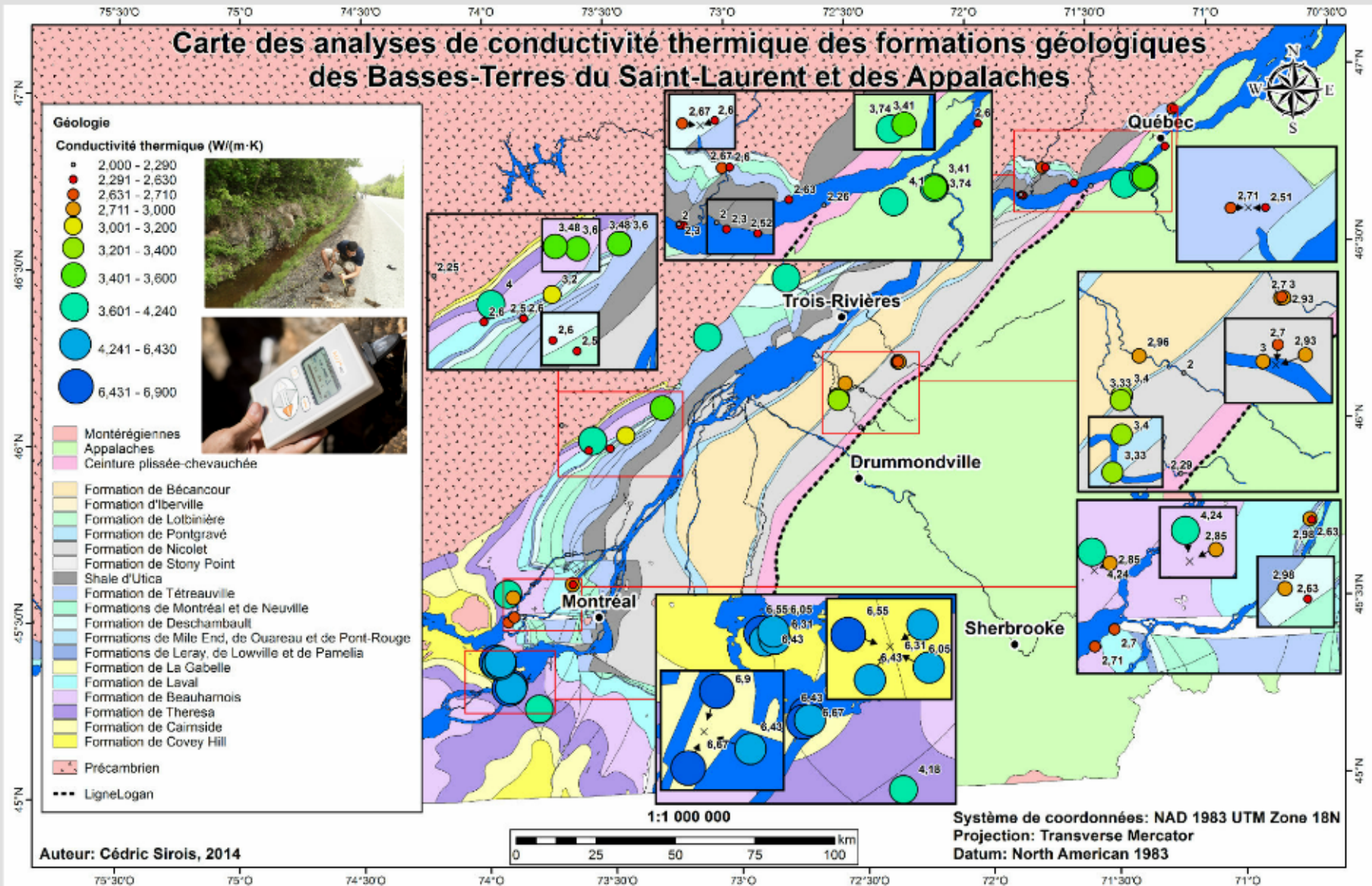
# Températures corrigées et gradient calculé



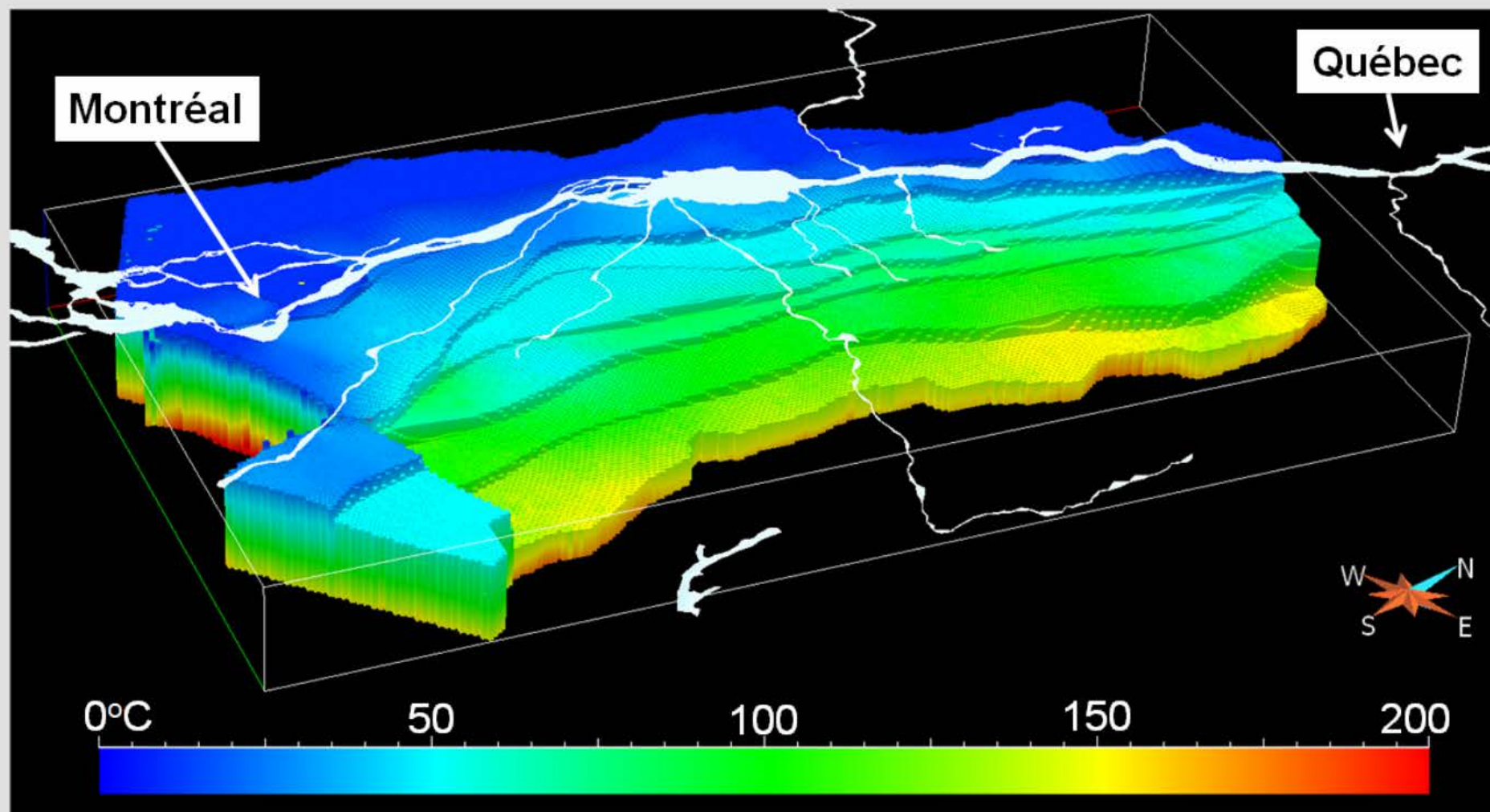
(Bédard et coll., 2014)



# Conductivité thermique des échantillons de surface

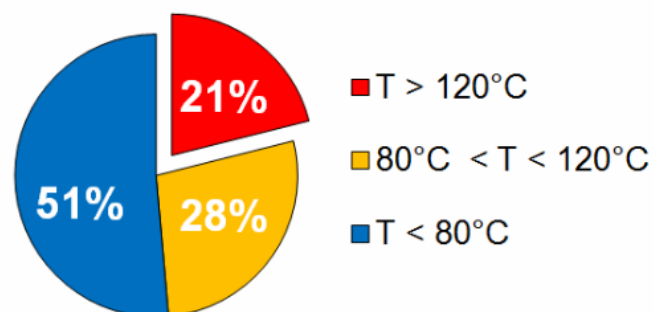


# Température extrapolée pour le Potsdam et le socle



# Ressources géothermiques du groupe de Potsdam

Volume du Potsdam en fonction  
de la température



$$G_p = \eta_G \times \frac{H_G}{t_E} \times \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T - T_o)$$

$H_G$  énergie thermique (J)

$\eta_G$  facteur de conversion 2,5%

$t_E$  periode d'exploitation (30 ans)

$$G_p = 12800 \text{ MW}_e$$

Pour T > 120 ° C

35 % de la puissance hydro-  
électrique installée au Québec



# Amélioration des méthodes de conception et d'opération des systèmes

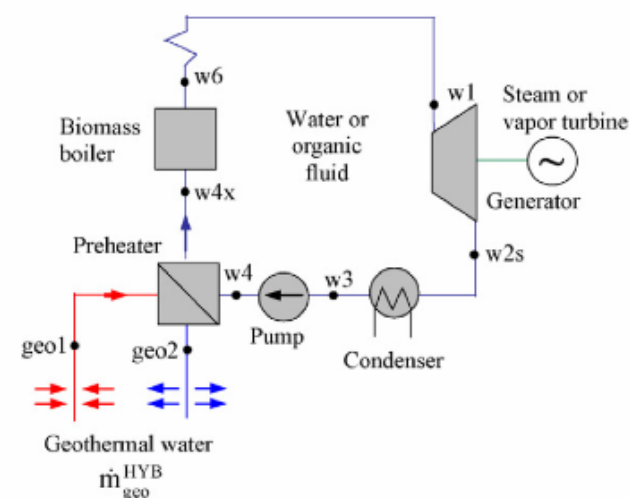
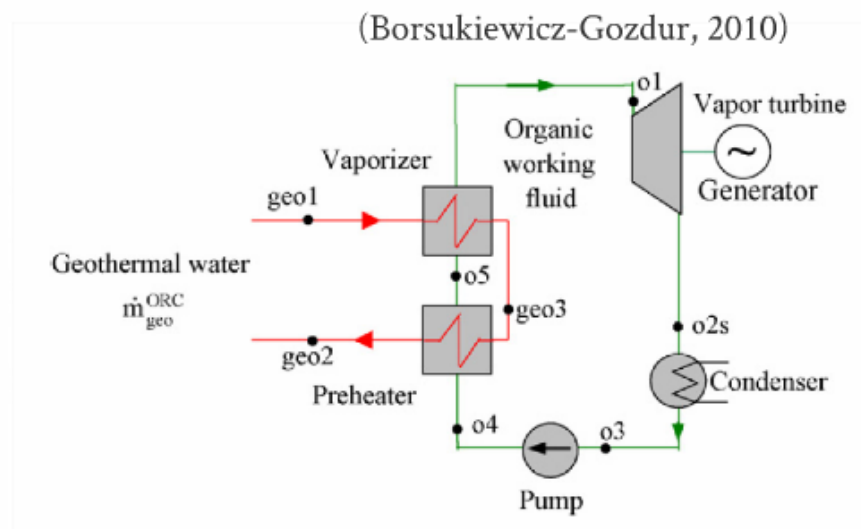
- Augmenter l'efficacité et la rentabilité des systèmes en perfectionnant les façons de concevoir et d'opérer
- Cycle de conversion de chaleur --> efficacité faible (20 % @ 120 °C)
- Taux d'extraction de chaleur du réservoir souterrain également bas
- Pompes à chaleur ---> efficacité élevée (COP > 3), mais besoin d'améliorer les méthodes de conception des échangeurs de chaleur

$$COP = \frac{Q}{W}$$



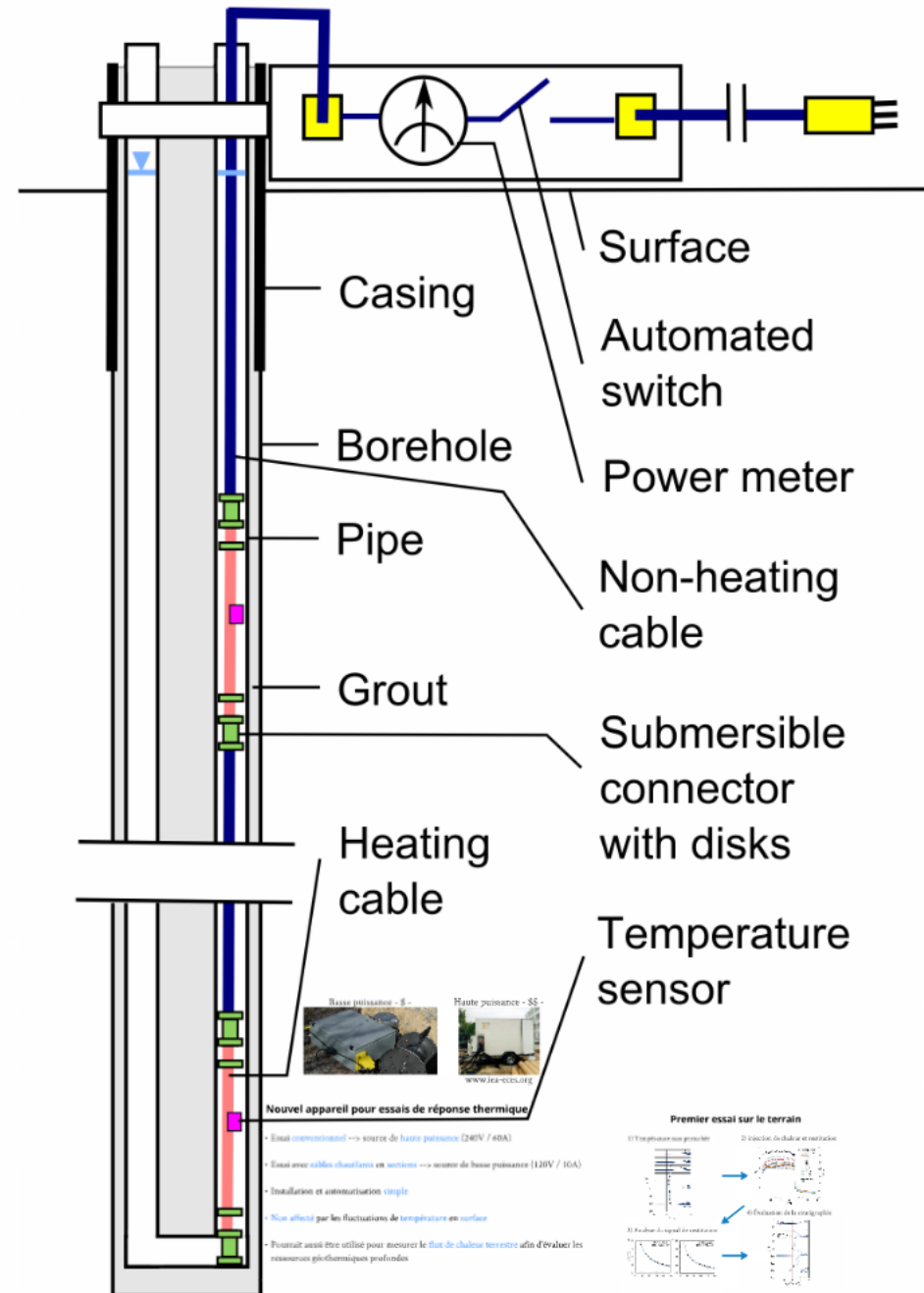
# Cycle de conversion de chaleur en électricité

- L'énergie électrique est produite à l'aide d'une **centrale binaire**
- Un apport en combustible (biogaz) dans un cycle **hybride** permettrait d'augmenter l'efficacité



# Essai de conductivité thermique en forage

- Mesurer les propriétés thermiques du sous-sol
- Pour la conception des systèmes de pompes à chaleur
- Injection de chaleur multiniveau
- Identification d'une stratigraphie thermique et des horizons favorables





Basse puissance - \$ -



Haute puissance - \$\$ -



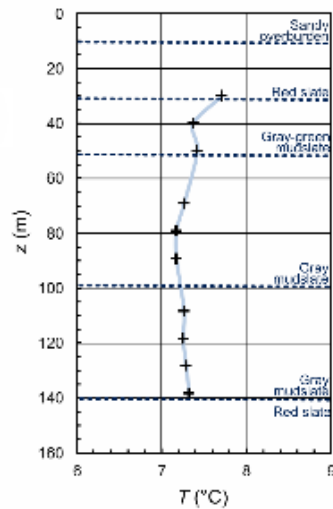
[www.iea-eces.org](http://www.iea-eces.org)

## Nouvel appareil pour essais de réponse thermique

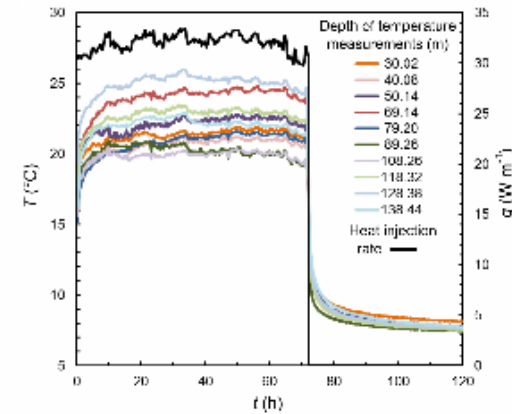
- Essai **conventionnel** --> source de **haute puissance** (240V / 60A)
- Essai avec **câbles chauffants** en **sections** --> source de basse puissance (120V / 10A)
- Installation et automatisation **simple**
- **Non affecté** par les fluctuations de **température** en **surface**
- Pourrait aussi être utilisé pour mesurer le **flux de chaleur terrestre** afin d'évaluer les ressources géothermiques profondes

# Premier essai sur le terrain

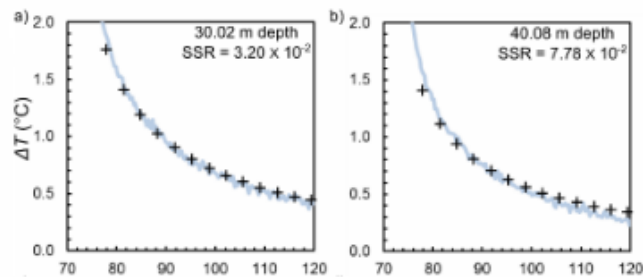
1) Température non perturbée



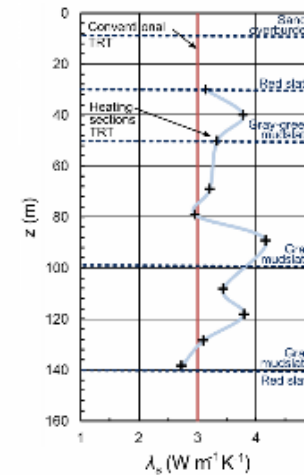
2) injection de chaleur et restitution



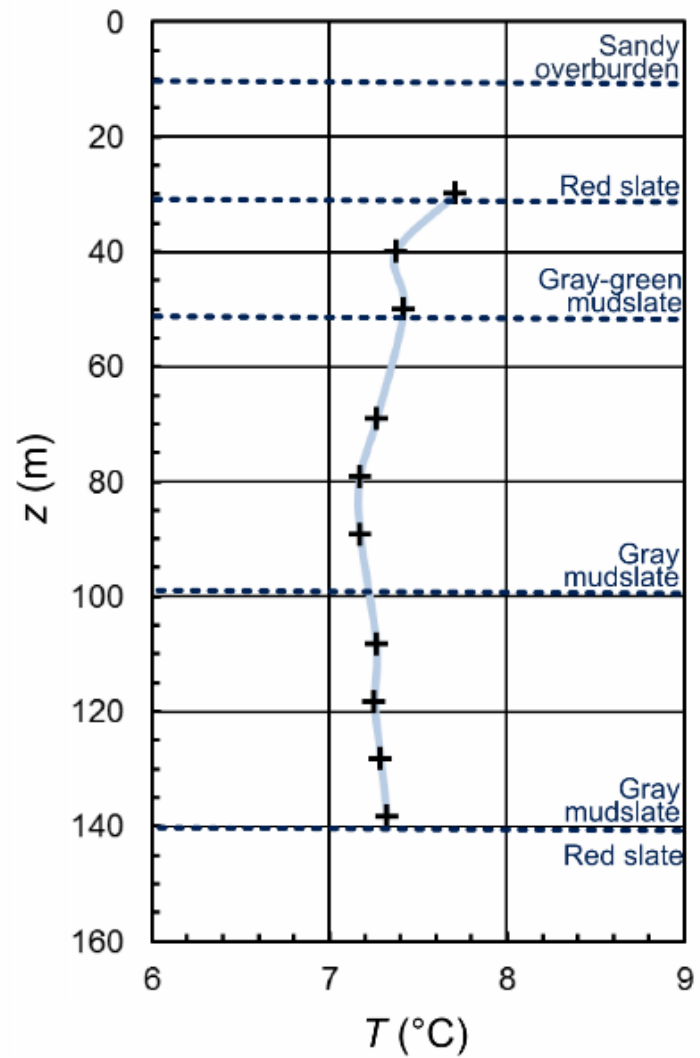
3) Analyse du signal de restitution



4) Évaluation de la stratigraphie

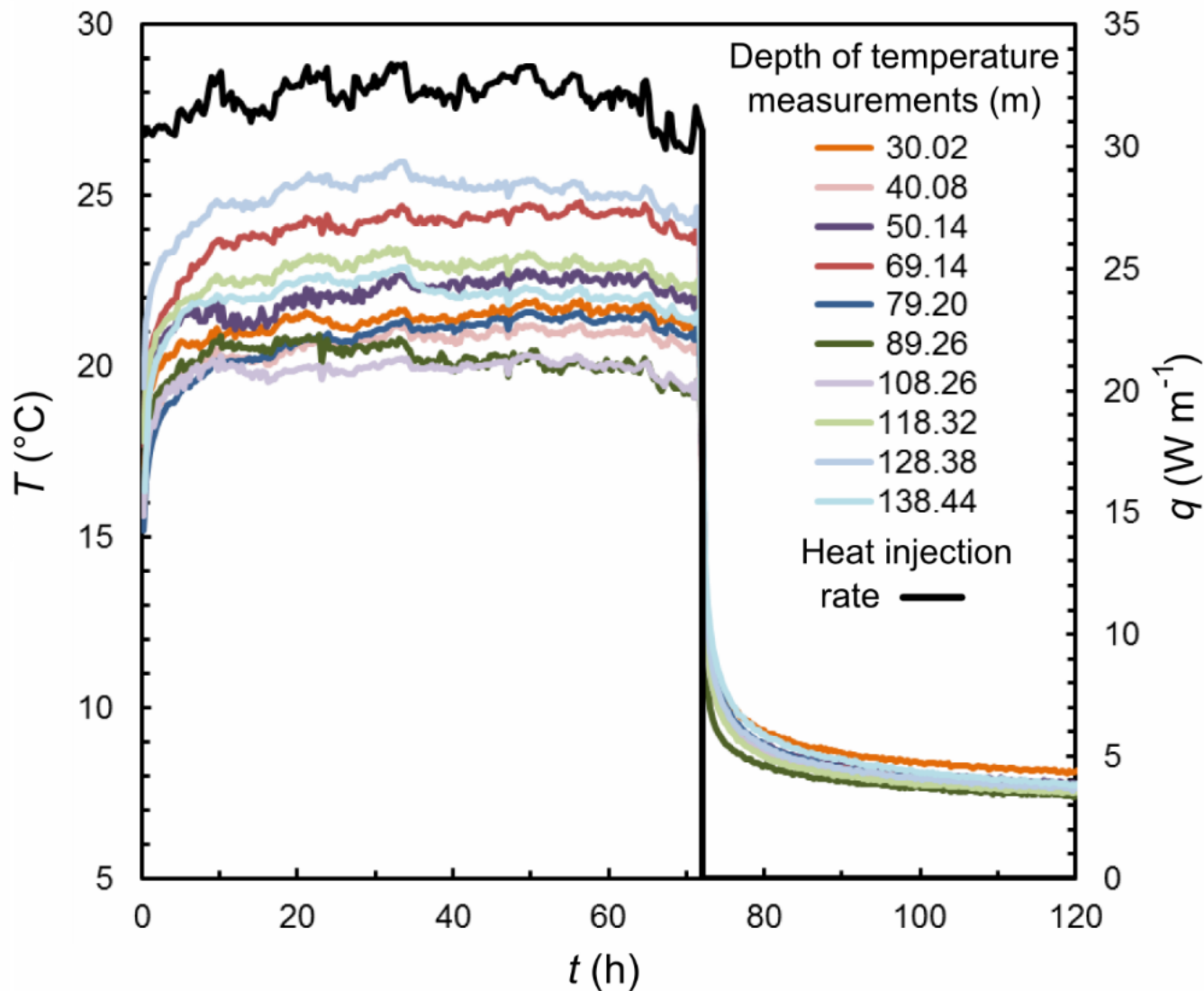


# 1) Température non perturbée

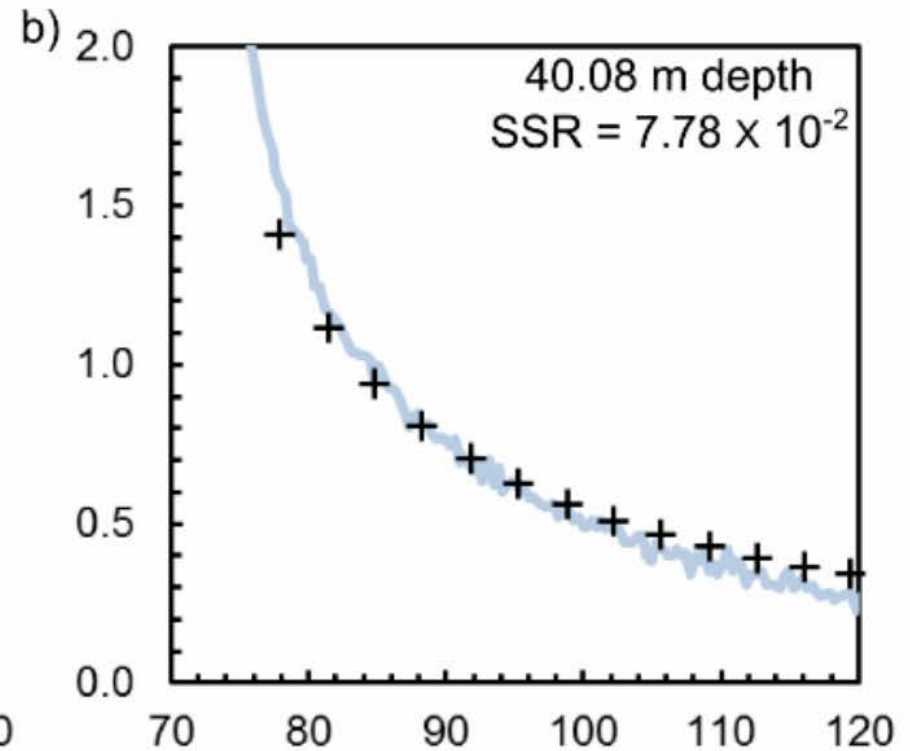
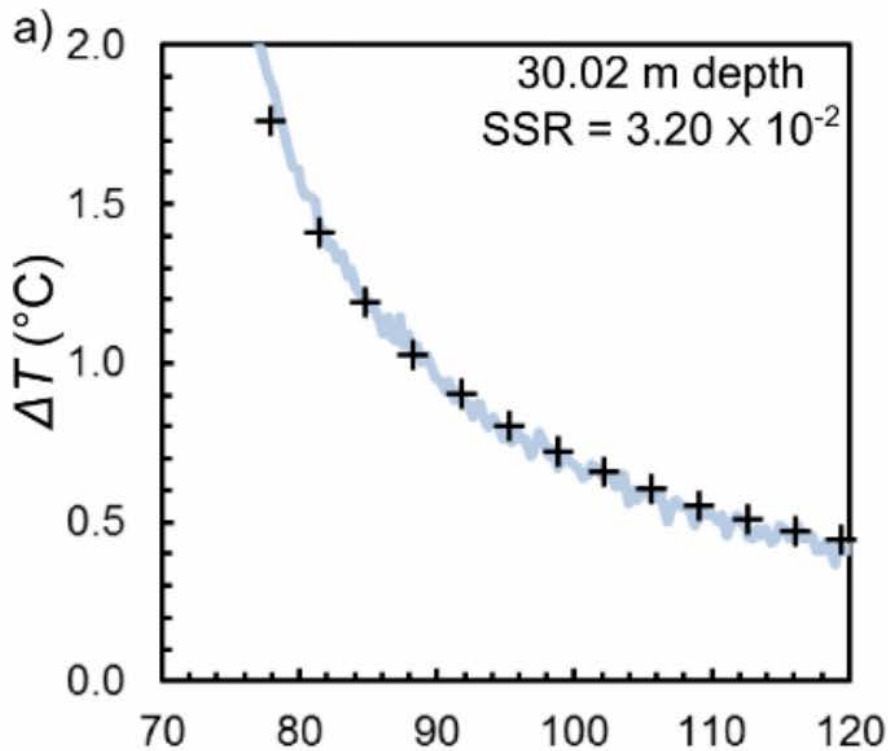




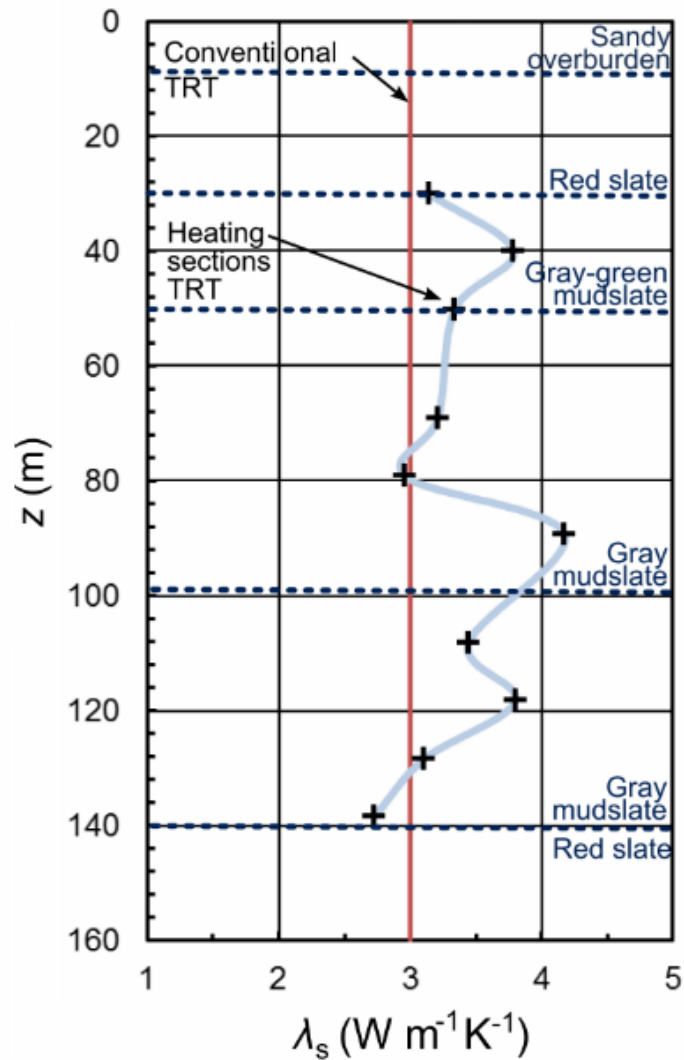
## 2) injection de chaleur et restitution



### 3) Analyse du signal de restitution



## 4) Évaluation de la stratigraphie



# *technologies*

## Développement de nouvelles

- Inventer et avancer le stade de maturité de nouvelles technologies pour **augmenter l'efficacité** et de **réduire le coût** d'installation des systèmes
- Développer la **propriété intellectuelle** liée aux produits et aux appareils

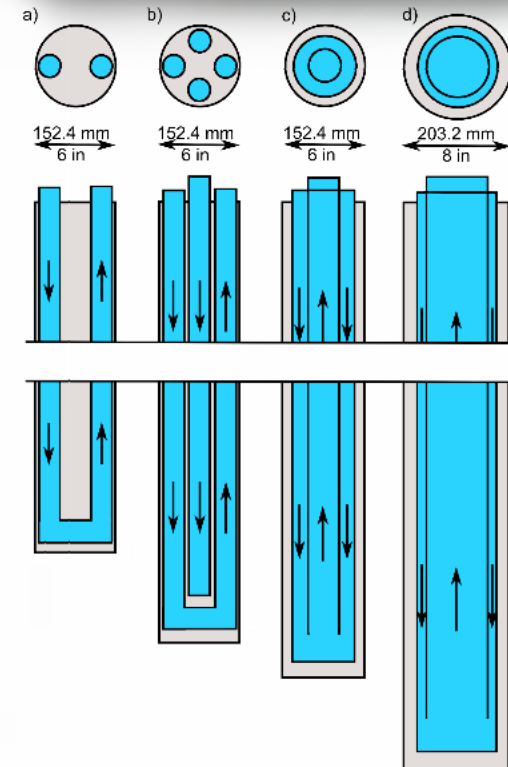




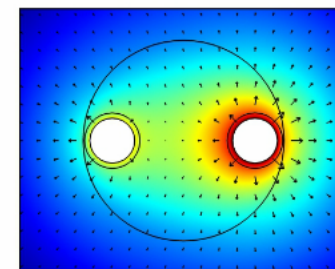
## Tuyaux à conductivité thermique améliorée

- Mélange de polyéthylène haute densité et de **nanoparticules**
- Augmentation de la conductivité thermique de **75 %**
- Réduit de **5 à 23 %** la **longueur** de forage pour les échangeurs de chaleur
- Les **meilleures performances** sont pour les échangeurs **2U** et **coaxiaux**

  
VERSAPROFILES



(Raymond et coll., 2015)



# Conclusions



- Émergence de l'industrie géothermique au Canada
- Possibilité d'augmenter la compétitivité et de favoriser la croissance par la recherche
- Besoins en formation de main d'œuvre importants puisqu'il y a peu d'expertise au Canada
- Opportunités de recherche présentes dans les secteurs de la génération d'électricité et du bâtiment
- Impact potentiel --> diversifier l'approvisionnement énergétique et diminuer les émissions de GES