



# Le potentiel de la géothermie peu profonde dans la transition énergétique

A. Dassargues



## **Géothermie**

- ➔ *fort potentiel pour contribuer aux besoins de chaleur et de froid*
- ➔ *se substituer aux sources énergétiques produisant des gaz à effet de serre*

***Utiliser les aquifères pour extraire et stocker de la chaleur ?***

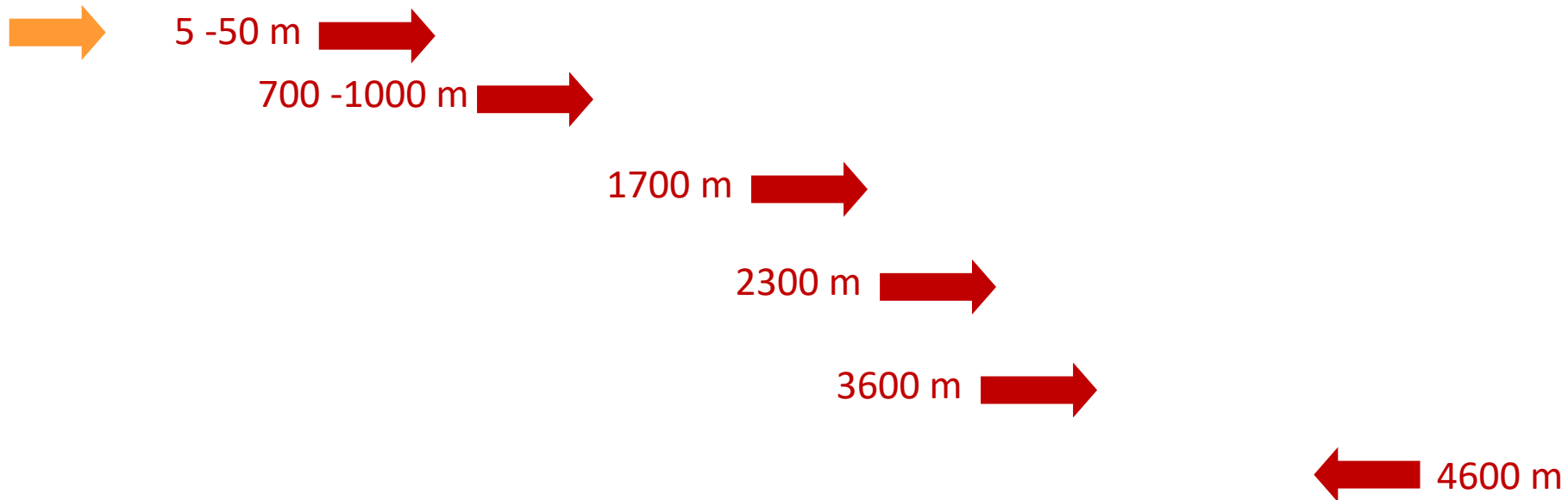
***pourquoi pas, mais ...***

***aquifères = formations géologiques perméables***

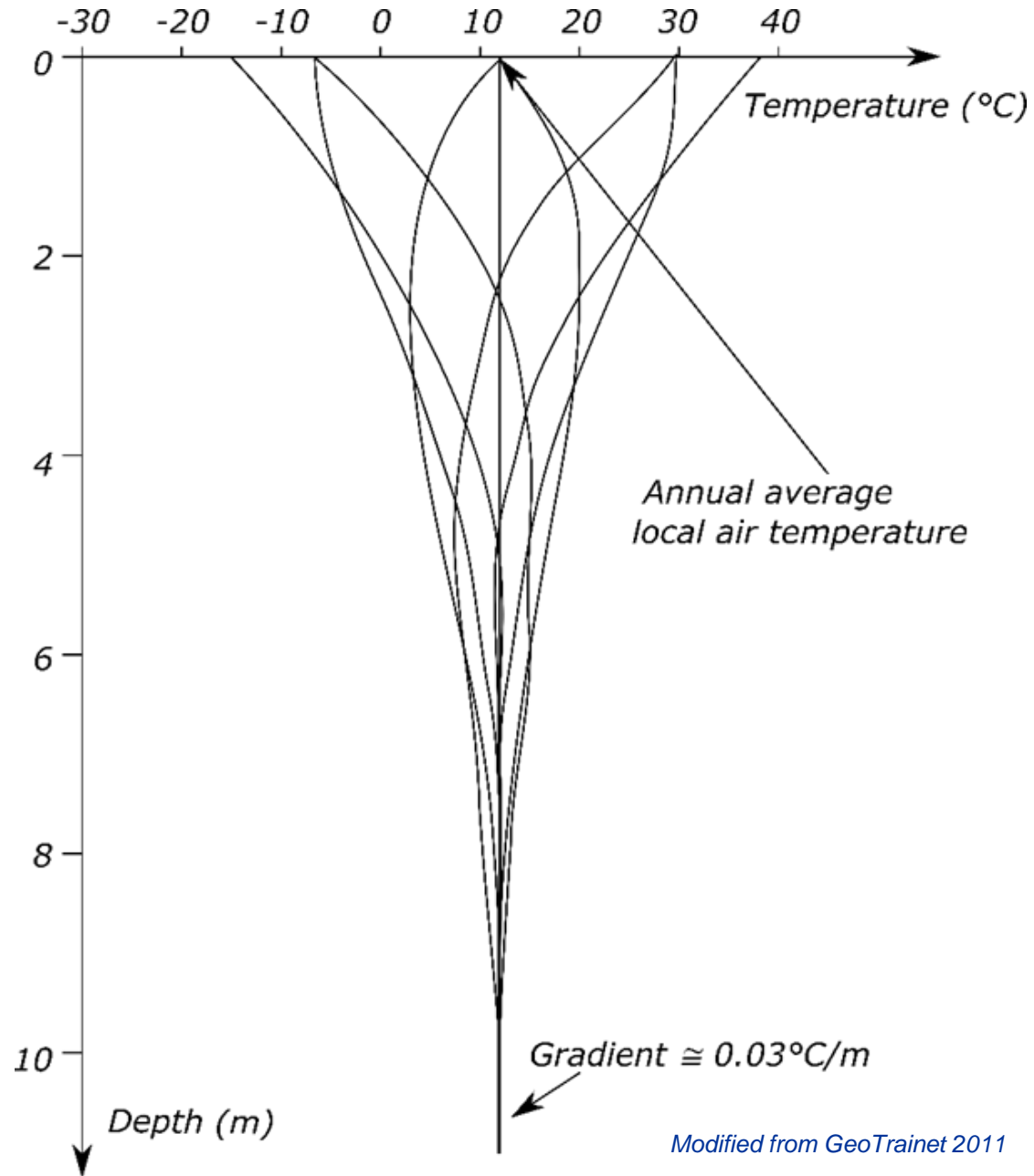
**Géothermie profonde:** gros risques financiers et environnementaux (forages + pompages)  
(gradient géothermique 3°/100 m)



**Géothermie de (très) basse température avec pompes à chaleur**



# Température du sous-sol immédiat



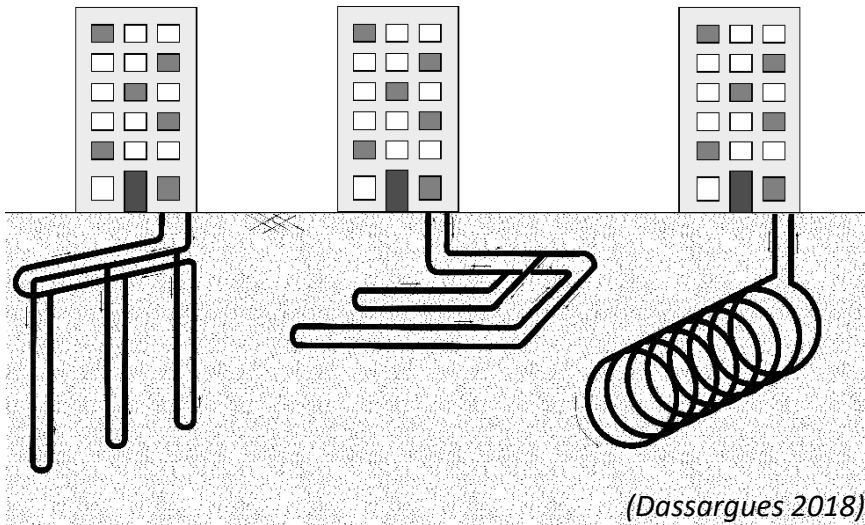


# Très faible $T^\circ$ : systèmes fermés et systèmes ouverts

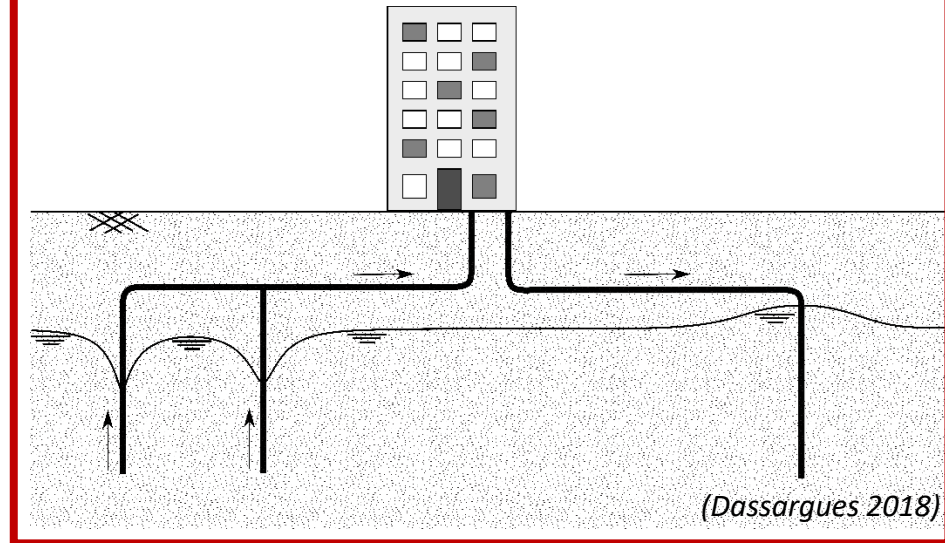
*Il faut étudier et quantifier :*

- les impacts sur le milieu
- l'efficacité (rendements) du système à court, moyen et long termes

*BTES – Borehole Thermal Energy Storage*



*ATES – Aquifer Thermal Energy Storage*



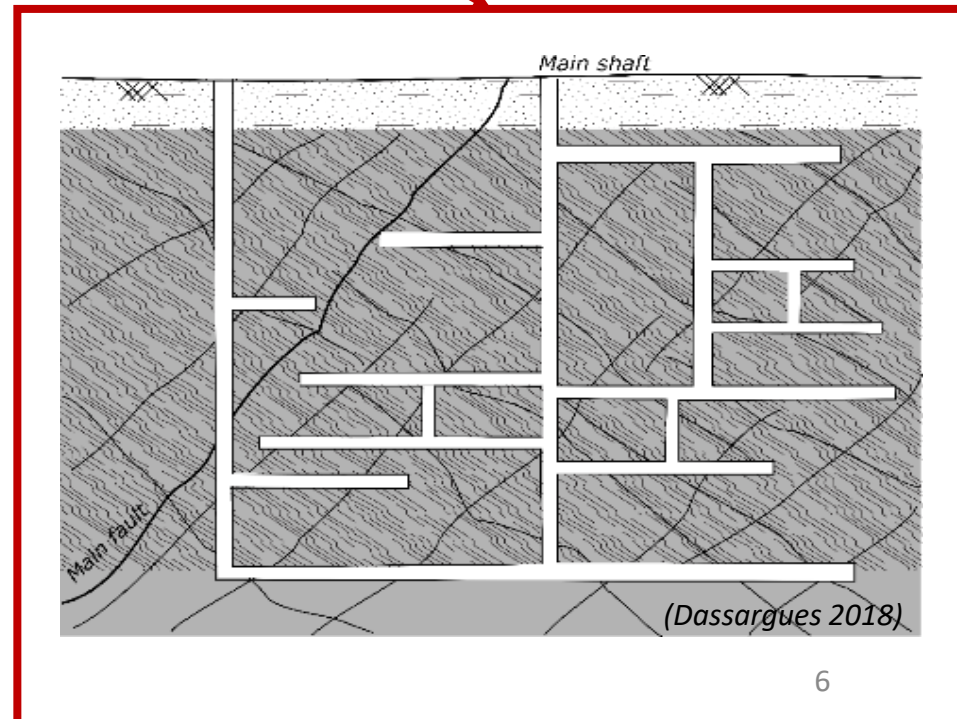


## **Faible T° (profondeur intermédiaire entre 150 et 1000m) circuits 'ouverts'**

- puits à colonne permanente (SCW - Standing Column Well)
- utilisation d'anciens travaux miniers

### **Etudier et quantifier :**

- les **impacts** sur le milieu
- l'**efficacité** (rendements) du système à court, moyen et long termes





# **Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?**

**→ injection et pompage dans une couche géologique**



**Les potentialités sont en principe grandes ...  
mais à vérifier en pratique**

- *jouer sur l'alternance saisonnière (géothermie + geocooling)*
- *espérer que la migration de chaleur au sein du sous-sol soit faible*
- *étudier les impacts*
- *étudier les rendements*

**ATES**



## **Géothermie ouverte ('open loop')**

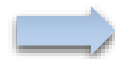
- grande capacité thermique de l'eau  
→ convient pour les puissances importantes
- $P$  proportionnelle au débit pompé  
→ gros débits de pompage

**MAIS** demande une couche aquifère et des investigations hydrogéologiques

(Wildemeersch et al. 2014, Hermans et al. 2015, Klepikova et al. 2016)

**Energie thermique produite via une pompe à chaleur, la puissance est  $P$  (en W) :**

$$P = P_{gw} / \left(1 - \frac{1}{COP}\right)$$


$$P = \frac{Q \Delta T \rho_w c_w}{\left(1 - \frac{1}{COP}\right)}$$

$COP$  = coefficient de performance de la machine thermique (pompe à chaleur) égal au rapport entre énergie utile produite et énergie électrique fournie à la machine thermique

$Q$  = débit du fluide caloporteur (eau) dans la machine thermique ( $m^3/s$ )

$\Delta T$  = différence de température entre l'amont et l'aval de la machine thermique ( $^{\circ}K$ )

$c_w$  capacité thermique du fluide (eau) in  $J/(kg^{\circ}K)$



# Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?



➔ efficacité et impact sont très liés : optimisation  
nécessaire

## Effacité

- pomper de gros volumes d'eau souterraine et les réinjecter demande une grande conductivité hydraulique  $K$  (aquifère)
- espérer que la chaleur n'ait pas (trop) migré entre 2 saisons: faibles flux souterrains (un faible gradient ou ... une faible conductivité hydraulique !!)

## Impact

- éviter les rabattements et remontées trop importants induisant tassements demande une grande conductivité hydraulique  $K$  mais aussi peu de terrains compressibles
- éviter des réchauffements de la nappe à moyen et long terme impliquant des changements physico-chimiques.

# **Impact/efficacité**



## **Aspects hydrodynamiques**

- *trouver les endroits où le compromis entre valeur de  $K$  et gradient hydraulique est acceptable pour inverser les puits à la saison suivante avec un maximum de rendement et un minimum d'impact sur les environs*

## **Aspects hydrochimiques**

- *transport réactif accentué par les changements de température favorisant corrosion ou précipitations/clogging notamment près du puits de réinjection*

# ***Beaucoup de réponses attendues de la phase d'étude et de caractérisation***



***... nécessaires également pour le 'permitting'***

- *détection des sites correspondant aux conditions hydrogéologiques qui conviennent*
- *calculer rigoureusement les rabattements induits et remontées*
- *calculer rigoureusement les impacts potentiels au niveau de la quantité et de la qualité des eaux souterraines*
- *appréhender l'hétérogénéité réelle et incertaine du site, et son influence potentielle sur les rendements et impacts*
- *calculer les rendements à long terme avec d'éventuels changements redox*

# Bien comprendre, caractériser et modéliser le système souterrain



## (1) Conduction thermique

... résultat du gradient thermique, existe sans écoulement d'eau souterraine,

le flux thermique de conduction [ $W/m^2$  ou  $J/(s.m^2)$  ]:

$$\lambda_b \nabla T$$

où  $\lambda_b$  est la conductivité thermique [ $W/(m.^{\circ}K)$ ] du milieu poreux (i.e. solide + eau)

- 0.2  $W/(m.^{\circ}K)$  pour des sédiments secs
- 4.5  $W/(m.^{\circ}K)$  pour un grès saturé
- 0.60  $W/(m.^{\circ}K)$  pour l'eau

**L'intervalle de variation est nettement plus petit que pour le conductivités hydrauliques**

Lithologie*	$\lambda_b$ ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
granites et gneiss	3,2 – 4,4
basaltes	3,0 – 3,5
quartzites	4,0 – 6,5
shales	1,5 – 3,5
micaschistes et ardoises	1,3 – 3,0
calcaires et dolomies	2,5 – 4,5
craies	1,5 – 2,5
grès	2,5 – 5,0
siltites	2,0 – 4,0
tuffs volcaniques	1,0 – 1,5
graviers	2,5 – 4,5
sables	3,0 – 5,5
silts	2,0 – 4,0
limons, loess et argiles	2,0 – 3,0
air	0,024 – 0,026
eau	0,57 – 0,60
matière organique	0,25 – 0,40



## **(2) Advection et/ou convection**

*... transfert de chaleur par mouvement de l'eau induit par gradient hydraulique (+ par gradient de température, convection thermique)  
le flux de convection [W/m<sup>2</sup> ou J/(s.m<sup>2</sup>)] :*

$$\rho_w c_w q T$$

*où  $\rho_w$  est la densité de l'eau [kg/m<sup>3</sup>],  $c_w$  est la capacité thermique de l'eau [J/(kg°K)],  $q$  est (principalement) le flux de Darcy [m/s].*



### **(3) Dispersion thermique**

*inférieure à la dispersion d'un soluté ... même si la dispersion thermique peut être considérée aussi bien à travers la phase fluide que solide*

*le flux de dispersion [W/m<sup>2</sup> ou J/(s.m<sup>2</sup>)] :*

$$\rho_b c_b \mathbf{D} \nabla T$$

*où  $\rho_b$  est la densité [kg/m<sup>3</sup>] du milieu poreux,  $c_b$  est la capacité thermique [J/(kg°K)] du milieu poreux*

*D est le tenseur de dispersion thermique dépendant du flux de Darcy  $q$  et des coefficients de dispersivité (longitudinale et transversale) thermique*

***La dispersion thermique est le plus souvent négligée par rapport à la conduction thermique !***

# Equation de transport de chaleur en milieu souterrain saturé



$$\frac{\partial \rho_b c_b T}{\partial t} = -\nabla \cdot [q \rho_w c_w T - \lambda_b \nabla T] \pm Q_T$$

$W/m^3$  ou  $J/(s.m^3)$

ou

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[ \frac{\rho_w c_w}{\rho_b c_b} q T - \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b} \nabla T \right] \pm Q_T / (\rho_b c_b)$$

*Advection/  
convection*

*Diffusion thermique incluant  
majoritairement la conduction*



# **Modélisations préalables, puis modélisations calibrées sur essais au site permettant de:**



- 1) *Tester et optimiser doublet géothermique*
- 2) *Calculer rabattements et remontées dans les environs*
- 3) *Evolution de la température de l'eau dans l'aquifère (et pompée) à court, moyen et long terme + bilan thermique*
- 4) *Modèle couplé de transport réactionnel: simulation des éventuels processus de 'clogging' et effets induits*
- 5) *Analyse de sensibilité des résultats aux incertitudes du site et aux différents scénarios énergétiques*

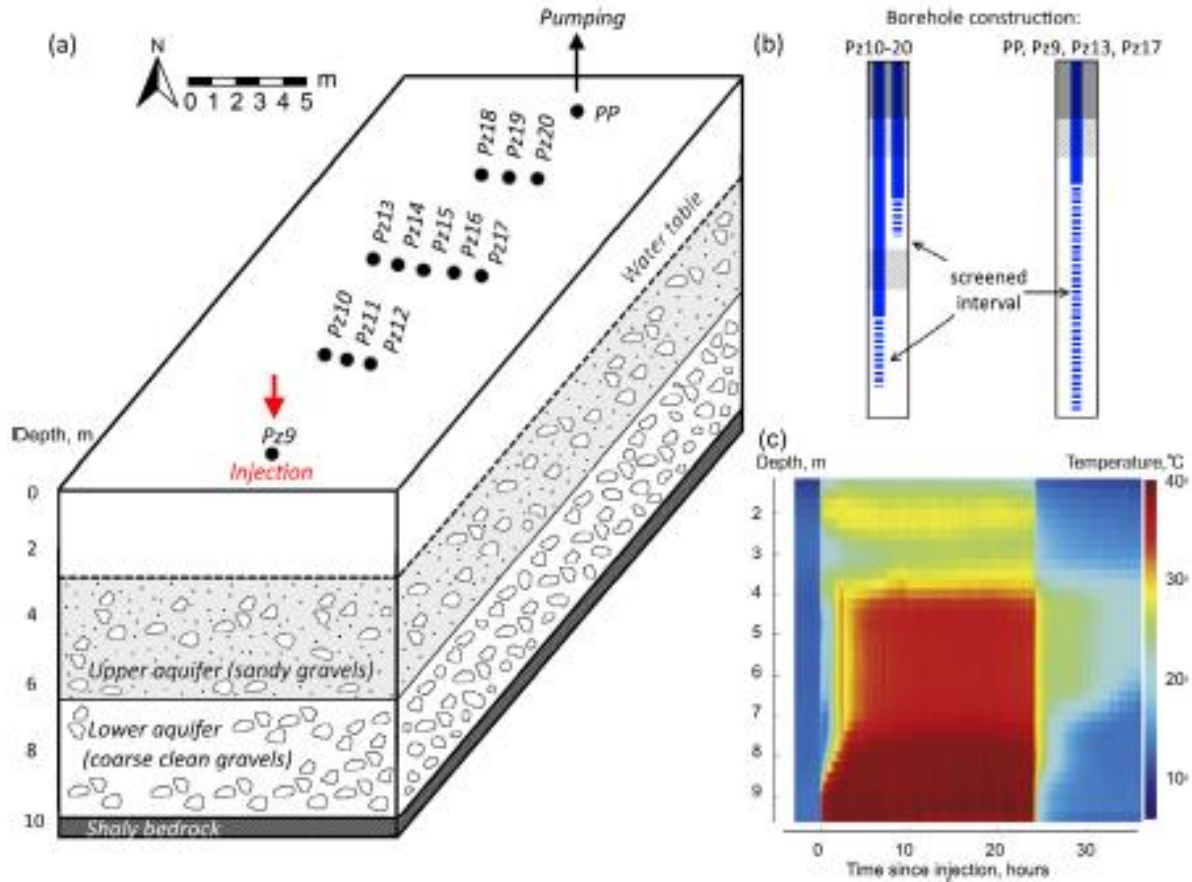
## **Essais sur le terrain**

- *essais de pompages et essais de traçages thermiques*

## **'Permitting' / autorisations**

*... pour les forages et équipements de puits, les conditions sectorielles sont encore (trop/fort) liées à la production d'eau (potabilisable)*

# Exemples d'essais de traçages thermiques



(Wildemeersch et al. 2014, Hermans et al. 2015, Klepikova et al. 2016)



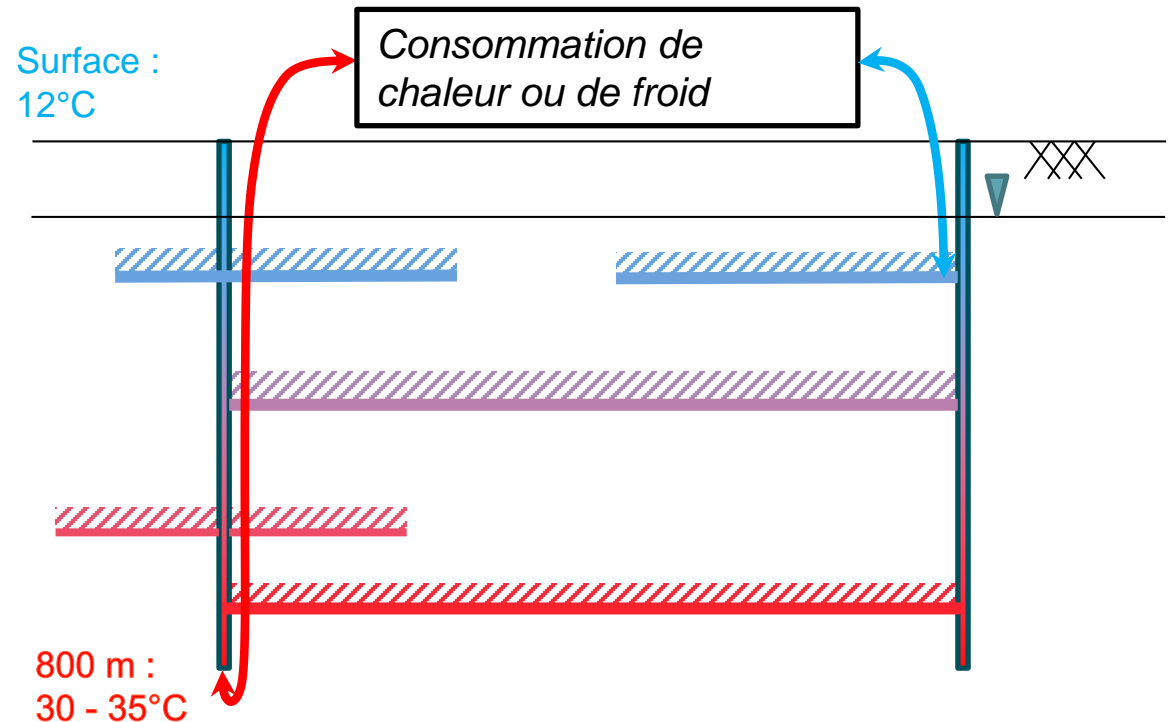
# Anciennes mines pour de la géothermie de basse température



**Mais:** réseau complexe de puits, galeries et zones exploitées interconnectées  
→ la géométrie réelle est compliquée et pas toujours parfaitement connue

Zones avec de larges vides  
(remplis d'eau souterraine)  
→ possible de pomper avec de gros débits

- ▶ Gradient géothermique  
→ eau chaude et froide
- ▶ Eau souterraine de mauvaise qualité, peu de conflits avec d'autres usages

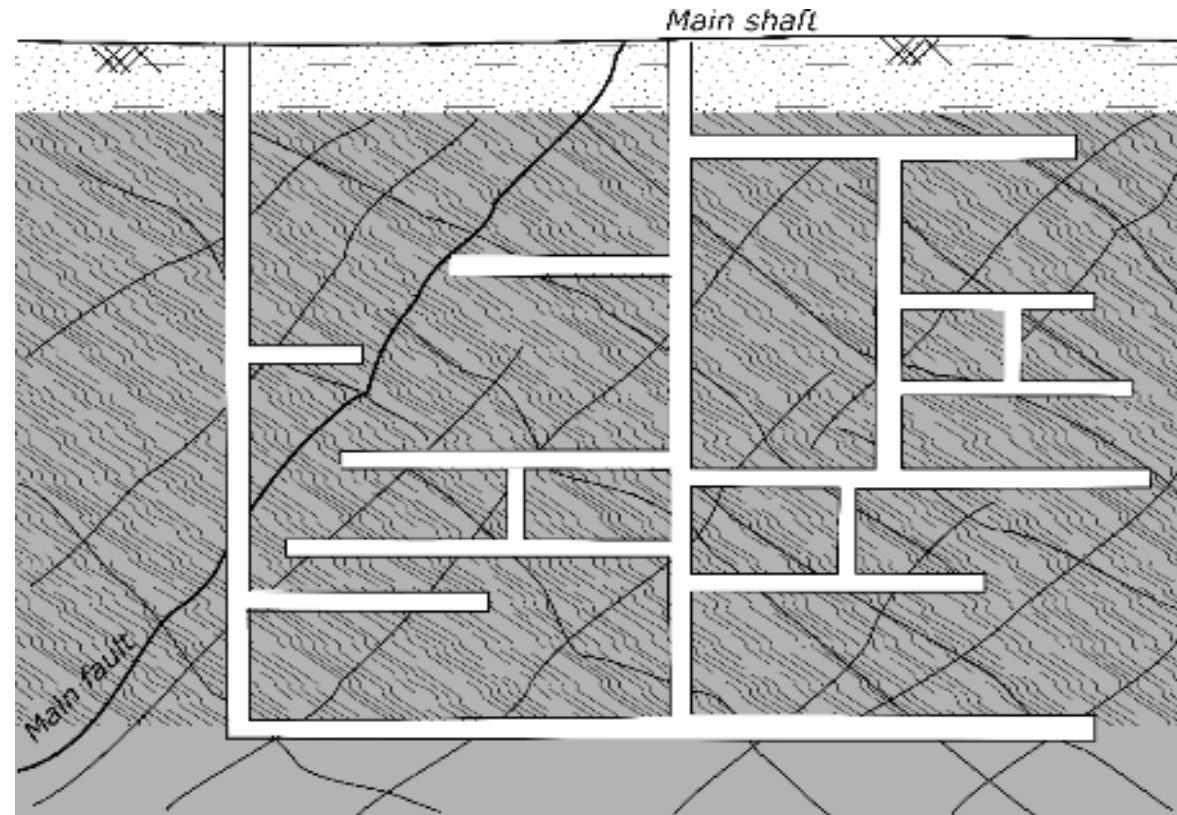


# Anciennes mines pour de la géothermie de basse température



**Mais:** réseau complexe de puits, galeries et zones exploitées interconnectées  
→ la géométrie réelle est compliquée et pas toujours parfaitement connue

- ▶ Conductivité hydraulique des formations géologiques augmentée par fracturation à cause des 'foudroyages'
- ▶ Écoulement très rapide dans les galeries et puits, (beaucoup) plus lent dans le massif rocheux fracturé/foudroyé



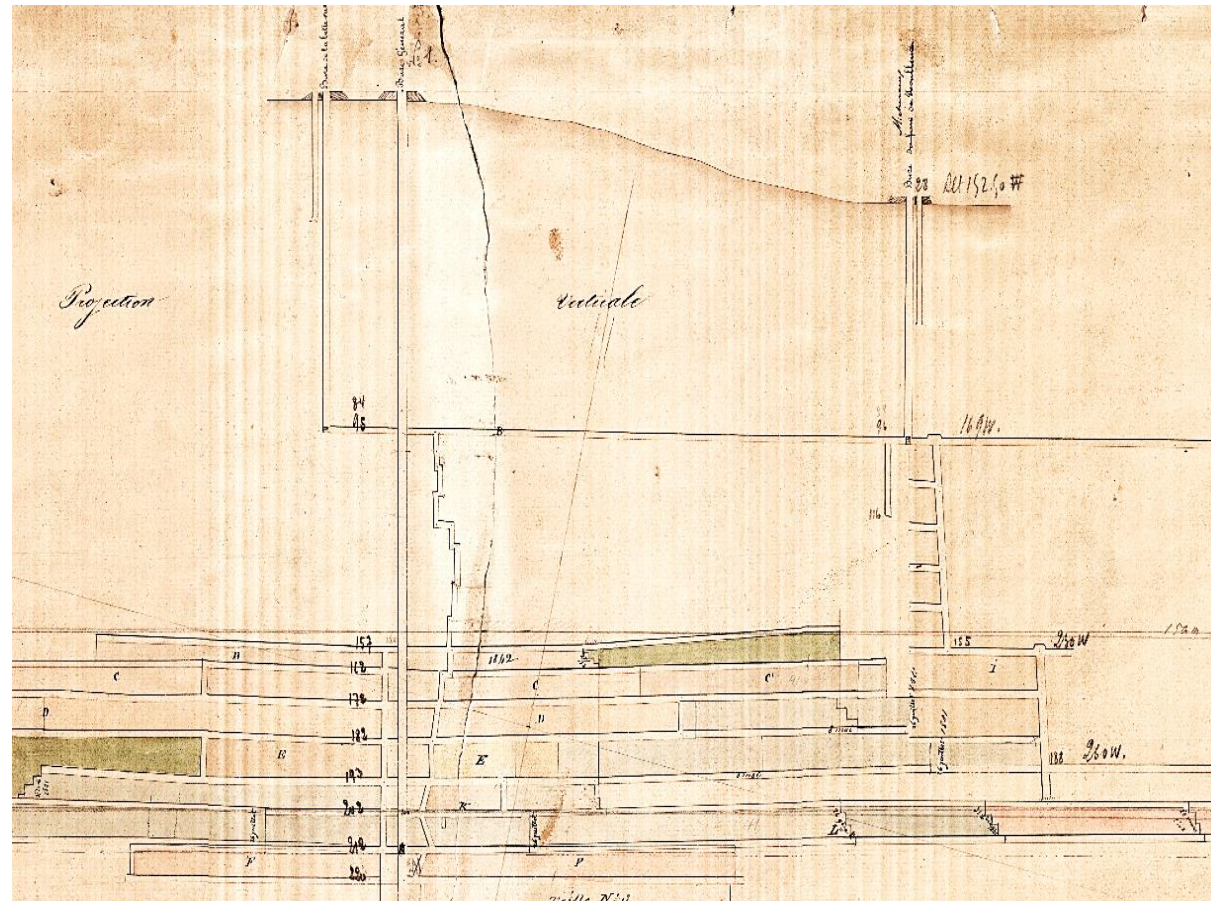
(Dassargues 2018)



# Anciennes mines pour de la géothermie de basse température



**Mais:** réseau complexe de puits, galeries et zones exploitées interconnectées  
→ la géométrie réelle est compliquée et **pas toujours parfaitement connue**

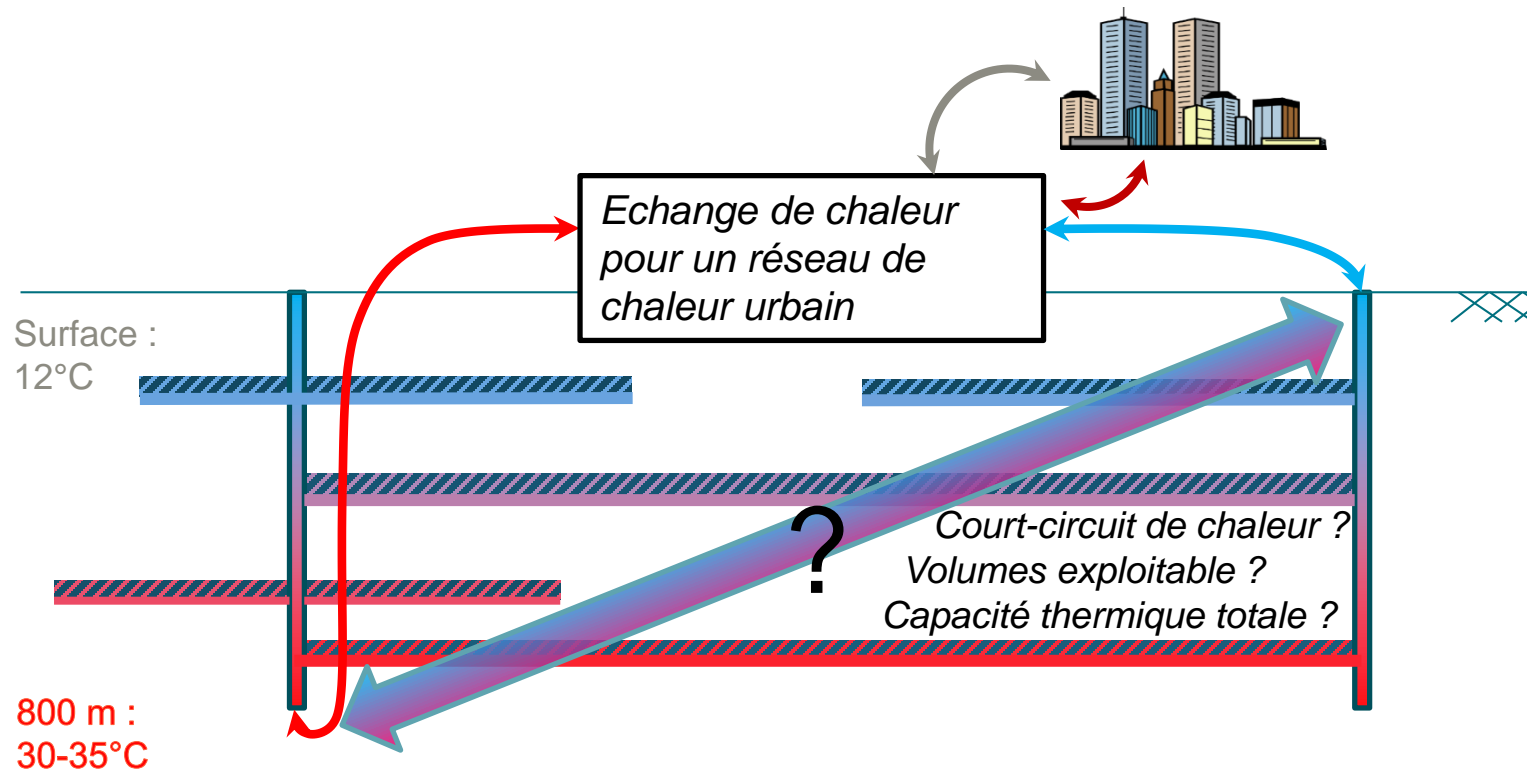


# Challenges



1) dans un puits, l'évolution de la température influence de la **convection induite** par des différences de densité de l'eau ('buoyancy forces')  
(i.e. l'eau froide est plus dense que l'eau chaude)

(Hamm and Bazargan Sabet 2010)



2) Écoulement ('pipe-like') et transfert de chaleur dans les galeries ouvertes et les puits couples à l'écoulement et le transfert de chaleur en milieu poreux /fracturé du massif rocheux fracturé

# Challenge 1: convection thermique naturelle dans les puits ouverts



*L'injection d'eau froide dans un puits ouvert*

*induit un mélange car l'eau froide est plus dense que l'eau chaude*

*(dans certains cas, l'eau souterraine profonde peut être plus salée induisant un frein à ce processus de mélange)*

*Pour une colonne d'eau dans un puits (i.e. sans milieu poreux ou fracturé), un nombre adimensionnel de Rayleigh est défini :*

*(Love et al. 2007)*

$$Ra = \frac{g\beta(\Delta h)^3 \Delta T}{\nu\kappa}$$

*$\beta$  = volumetric thermal expansion coefficient ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )*

*$\Delta h$  = the height of the water column in the shaft (m)*

*$\Delta T$  = the temperature difference between the bottom and top of the shaft ( $^{\circ}\text{K}$ )*

*$\nu$  = the kinematic viscosity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )*

*$\kappa$  = the thermal diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )*

**... un rapport entre la convection naturelle et la diffusion thermique**



# Challenge 1: convection thermique naturelle dans les puits ouverts



*La valeur critique de  $Ra$  pour le passage à de la convection naturelle dans un puits dépend principalement du rapport entre le rayon du puits et la hauteur de la colonne d'eau dans le puits*

➡  $\delta = r / \Delta h$  (Love et al. 2007, Hamm & Bazargan Sabet 2010)

➡  $Ra_c = \frac{215.6}{\delta^4} (1 + 3.84 \delta^2)$

➡ *il est donc plus efficace de pomper/injecter dans des puits de faible diamètre  
(la valeur critique est calculée pour des parois rigides: cela ne change pas beaucoup -diminution- si un milieu poreux remplace les parois solides) (Love et al. 2007)*

# Challenge 1: convection thermique naturelle dans les puits ouverts



Quand l'advection est considérée, un nombre adimensionnel mixte de convection est défini:  $M$  (égal au rapport  $Ra/Pe$ )

(Holzbecher and Yusa 1995, Graf and Simmons 2009)

$$\Rightarrow M(T) = [\rho_{max} - \rho(T)] / \left[ \rho(T) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad \frac{\partial h}{\partial z} = \text{gradient piézométrique vertical}$$

**si  $M > 1$  il est important de considérer la convection naturelle par rapport à l'advection ('convection forcée')**

$Pe = c_w q l / \lambda_b$  = rapport entre l'advection et la conduction thermique

(Huysmans & Dassargues 2005, Fox et al. 2016, Ma & Zheng 2010)

## Challenge 2: court circuit thermique



*Deux approches:*

- *approche essai-erreur ('trial and error')*
- *simulations couplées de l'écoulement et du transport*

*'pipe-like' écoulement et transfert de chaleur dans les galeries et puits ouverts **doit être couplé** à l'écoulement des eaux souterraines et au transfert de chaleur en milieu poreux et fracturé dans le massif rocheux*

*(Holzbecher and Yusa 1995, Graf and Simmons 2009)*

## **Challenge 2: court circuit thermique**



*Essai et erreur: il faut être prêt à modifier/adapter complètement le système d'énergie*



## Challenge 2: court circuit thermique

*Essai et erreur: il faut être prêt à modifier/adapter complètement le système d'énergie*

### ▶ *Minewater 1.0 (2008 – 2012)*

- *Geothermy is a heat and cold source for urban supply*
- *First (big) works: boreholes in 2006-2007 + heat pumps + pipe network*

### ▶ *Minewater 2.0 (2012 – 2017)*

- *Geothermy is now used as a heat buffer*
- *Users and energy producers (e.g. solar panels) clusters*

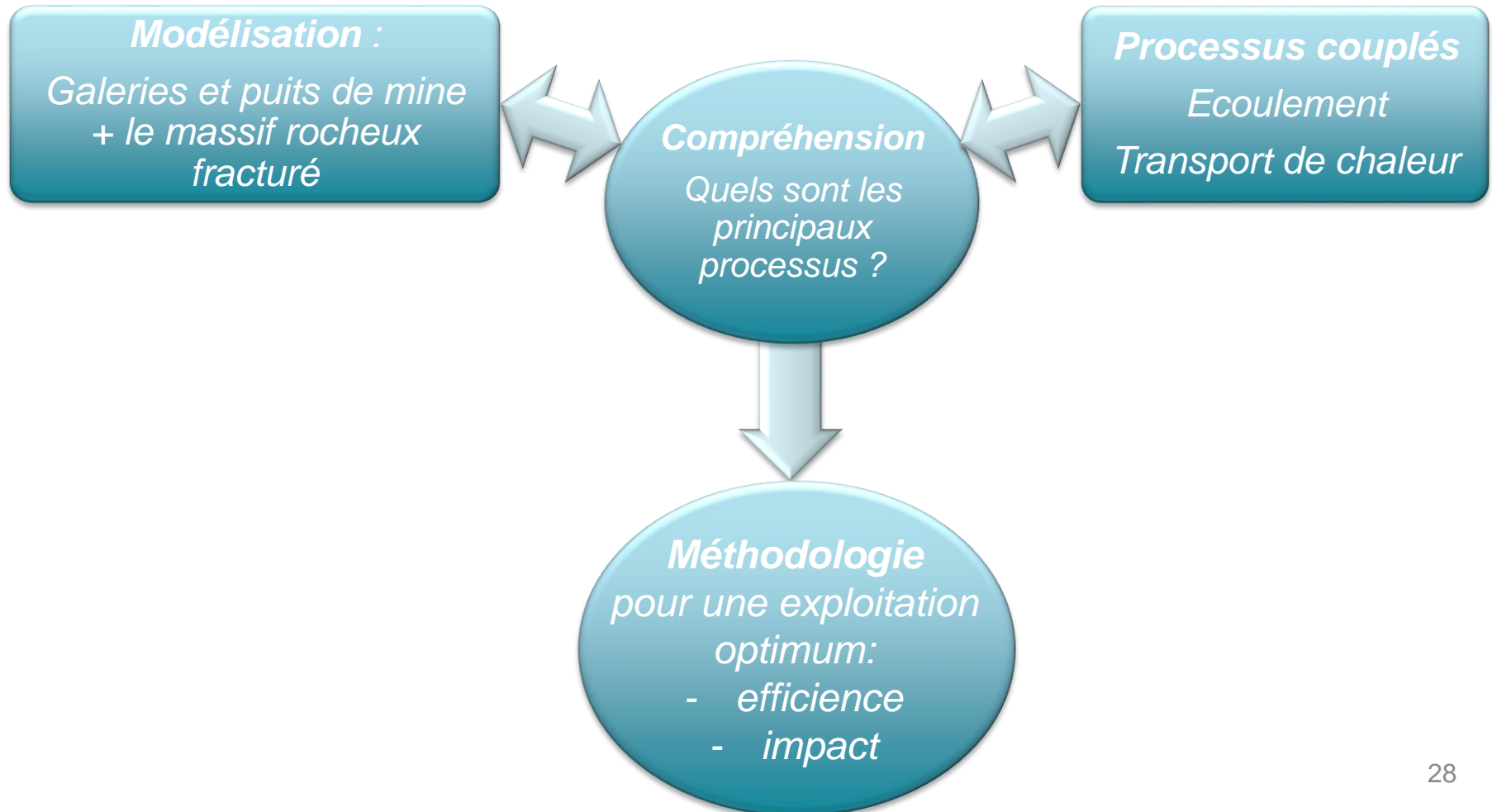
### ▶ *Minewater 3.0 (later)*

- *Optimization of the grid*
- *Use of predictive statistical methods, ...*

# Challenge 2: court circuit thermique



2<sup>ème</sup> approche: simulations couplées de l'écoulement et du transport de chaleur pour prédictions



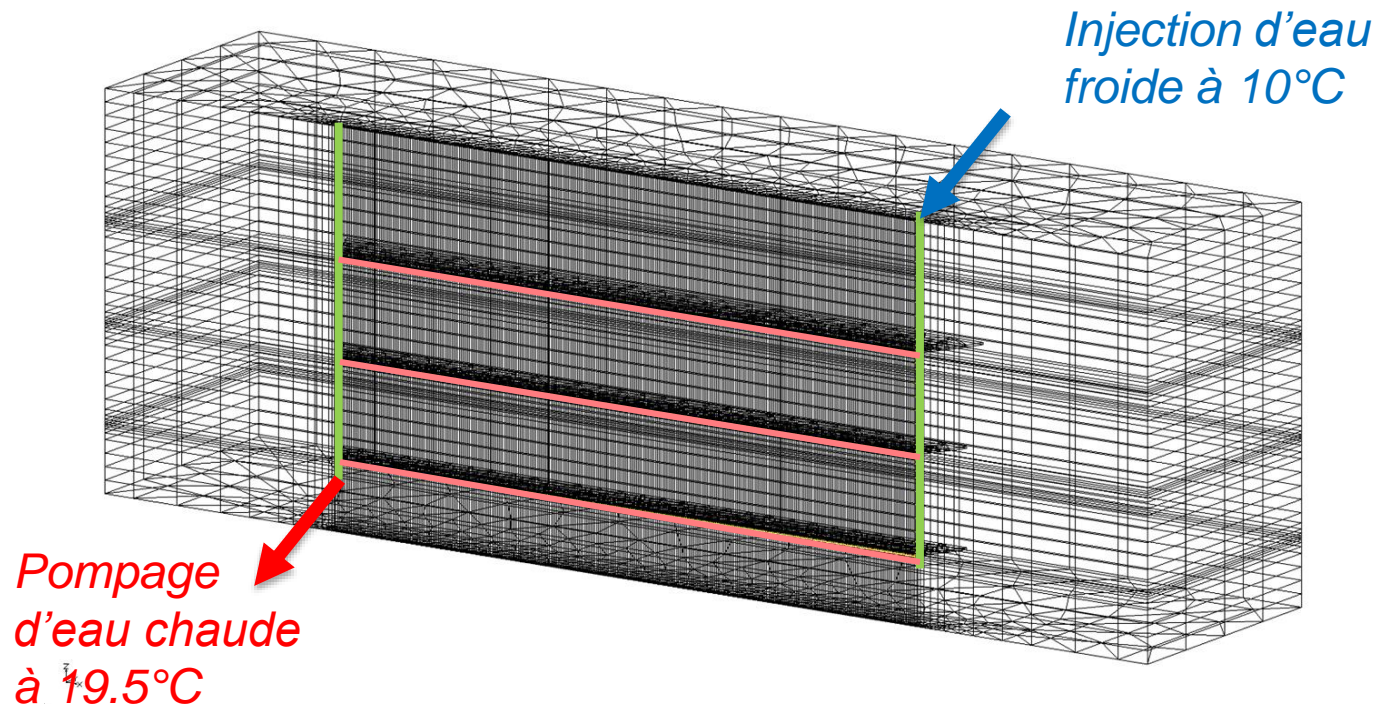


## Challenge 2: court circuit thermique

Application simplifiée basée sur un cas réel

Rmq: les puits ont été remblayés il ya 40 ans avec des matériaux 'indéterminés'

simulations de différents rapports de  $K_{\text{shaft+galleries}}/K_{\text{bedrock}}$







$$\frac{K_{shaft+galleries}}{K_{bedrock}} = 10^{1,5}$$

$$\frac{K_{shafts+galleries}}{K_{bedrock}} = 10^3$$

$$\frac{K_{shafts+galleries}}{K_{bedrock}} = 10^4$$

# Facing the challenges



## Nos limitations:

- *peu de données*
- *domaine important et complexe à simuler*
- *gros contrastes de conductivités et porosités, et donc de vitesses de flux d'eau et de chaleur*
- *domaines de géométries très particulières (galeries, puits, zones déconsolidées, massif rocheux, ...)*

## **Modélisation 'classique' n'est pas appropriée**

### Nos ambitions:

- ▶ *optimisation: pour trouver les meilleurs débits exploitables avec contrastes maximum de températures*
- ▶ *maximiser l'énergie exploitable de la mine et du massif rocheux environnant (volume impacté)*
- ▶ *prédictions à long terme de l'efficacité énergétique*
- ▶ *prédictions à court, moyen et long terme des impacts possibles dans l'environnement immédiat*

# Conclusions



- ▶ *Transition énergétique = changements sociétaux fondamentaux*
- ▶ *utilisation de l'eau souterraine pour l'énergie thermique (ATES - Aquifer Thermal Energy Storage) est une des options*
- ▶ *mais interactions entre projets géothermiques et avec d'autres usages des eaux souterraines ... et risques associés (Kabuth et al. 2017)*
- ▶ *chaque site: optimisation des systèmes pour efficacité et impact ... en tenant compte des incertitudes dues à l'hétérogénéité du sous-sol*
- ▶ *échelle du projet = facteur important pour faisabilité (coût important pour forages et échangeurs de chaleur)*
- ▶ *délais de retour sur investissement des projets varient entre 2 et 10 ans (Coenen et al. 2010) diminuent avec forte demande de refroidissement*
- ▶ *idéal pour gros bâtiments récents, mais stocker du froid constitue le 'worst case scenario' énergétique*
- ▶ *principal frein à ces systèmes: 'permitting' = obtention des autorisations de pompage et réinjection + cadre réglementaire clair pour traiter des intérêts conflictuels des différents utilisateurs du sous-sol et du sol*

# Références (parmi d'autres)



- ▶ Dassargues A., 2018. *Hydrogeology: groundwater science and engineering*, 472p. Taylor & Francis CRC press, Boca Raton.
- ▶ Eppelbaum, L., Kutasov, I. and A. Pilchin. 2014. *Applied Geothermics*, Series: Lecture Notes in Earth System Sciences. Berlin Heidelberg :Springer-Verlag.
- ▶ Florea, L. J., Hart, D., Tinjum, J. and C. Choi. 2017. Potential impacts to groundwater from ground-coupled geothermal heat pumps in district scale. *Groundwater* 55(1): 8-9.
- ▶ Fox, D. B., Koch, D.L. and J. W. Tester. 2016. An analytical thermohydraulic model for discretely fractured geothermal reservoirs, *Water Resources Research* 52 : 6792–6817.
- ▶ Graf T. and C.T. Simmons. 2009. Variable-density groundwater flow and solute transport in fractured rock: Applicability of the Tang et al. [1981] analytical solution. *Water Resources Research* 45 :W02425.
- ▶ Hamm, V. and B. Bazargan Sabet. 2010. Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France. *Geothermics* (39) :177-186.
- ▶ Hermans, T., Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, P., Brouyère, S., Dassargues, A. and F. Nguyen. 2015. Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT, *Geothermics* 53 : 14-26.
- ▶ Huysmans, M. and A. Dassargues. 2005. Review of the use of Peclet numbers to determine the relative importance of advection and diffusion in low permeability environments. *Hydrogeology Journal* 13(5-6) : 895-904.
- ▶ Kabuth, A., Dahmke, A., Beyer, C., Bilke, L., Dethlefsen, F., Dietrich, P., Duttmann, R., Ebert, M., Feeser, V., Görke, U.-J., Köber, R. Rabbel, W., Schanz, T., Schäfer, D., Würdemann, H. and S. Bauer. 2017. Energy storage in the geological subsurface: dimensioning, risk analysis and spatial planning: the ANGUS+ project. *Environmental Earth Science* 76: 23.
- ▶ Klepikova, M., Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, Ph., Hermans, T., Nguyen, F., Brouyere, S. and A. Dassargues. 2016. Heat tracer test in an alluvial aquifer: field experiment and inverse modelling, *Journal of Hydrology*, 540 :812-823.
- ▶ Love, A. J., Simmons, C.T. and D. A. Nield. 2007. Double-diffusive convection in groundwater wells, *Water Resources Research* 43(8) : W08428.
- ▶ Ma, R. and Ch. Zheng. 2010. Effects of density and viscosity in modeling heat as a groundwater tracer. *Ground Water* 48(3) : 380–389.
- ▶ Stauffer, F., Bayer, P., Blum, Ph., Molino-Giraldo, N. and W. Kinzelbach. 2014. *Thermal use of shallow groundwater*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- ▶ Vopat, O. 2017. Modélisation des caractéristiques hydrogéologiques liées à une exploitation géothermique d'anciennes mines, Master Ing. des Mines et Géologue, ULiège.
- ▶ Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, P., Hermans, T., Klepikova, M., Nguyen, F., Brouyère, S. and A. Dassargues. 2014. Coupling heat and chemical tracer experiments for estimating heat transfer parameters in shallow alluvial aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology* 169(0): 90–99.