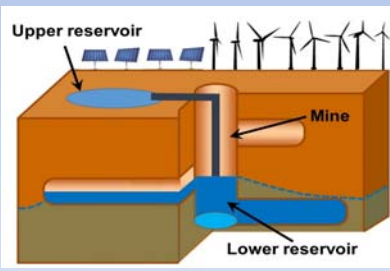
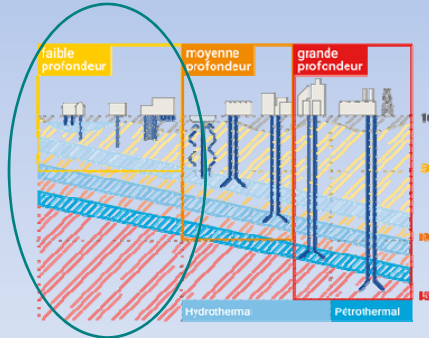


UEE
Urban & Environmental Engineering


Sous-sol et énergies renouvelables: hydroélectricité souterraine & géothermie de faible température



Upper reservoir
Lower reservoir
Mine



faible profondeur moyenne profondeur grande profondeur
10°
50°
100°
130°
Hydrotherma Pétrothermal



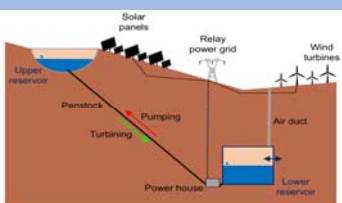
LIEGE CREATIVE
Forum Innovat. et Entrepreneuriale

A. Dassargues

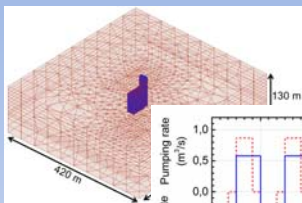
1

Liege Creative 31/05/2018

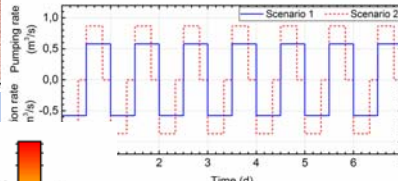
UPSH = Underground Pumped Storage Hydroelectricity ...



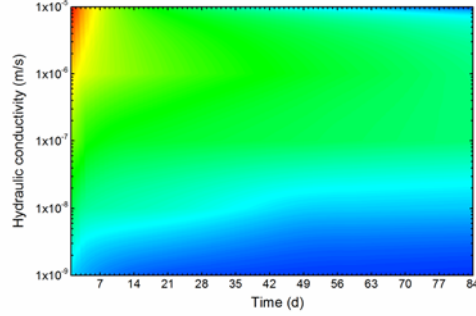
Solar panels
Relay power grid
Wind turbines
Upper reservoir
Pneumatic
Pumping
Turbining
Power house
Lower reservoir
Air duct



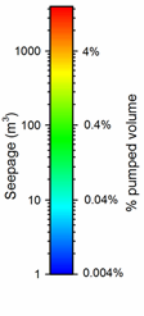
130 m
420 m



Ion rate Pumping rate (m³/s)
n (%)
1.0
0.5
0.0
-0.5
Time (d)
Scenario 1
Scenario 2



Hydraulic conductivity (m/s)
1x10⁻⁵
1x10⁻⁶
1x10⁻⁷
1x10⁻⁸
1x10⁻⁹
Time (d)
7 14 21 28 35 42 49 56 63 70 77 84



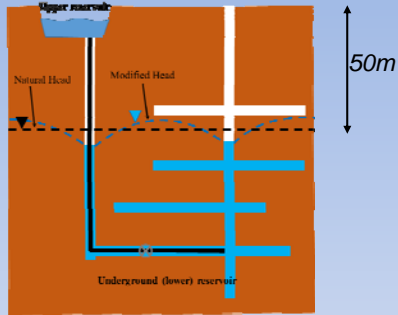
Seepage (m³)
1000
100
10
1
4%
0.4%
0.04%
0.004%
% pumped volume

Echanges avec le milieu souterrain

- Low K → negligible
- High K → then ↘ over time

2

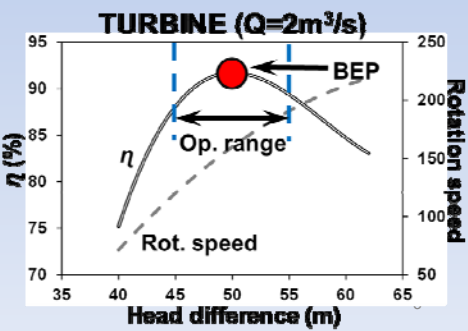
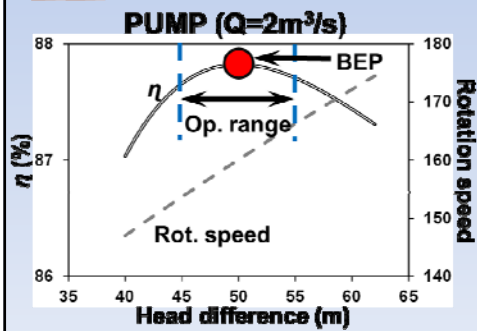
UPSH : 2 aspects à étudier : impact et efficacité



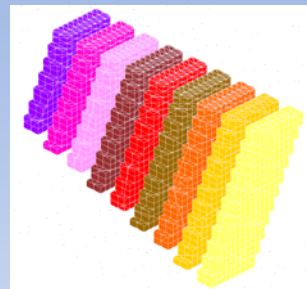
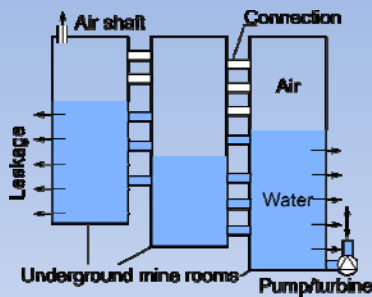
Courbes calculées pour un débit constant et des vitesses de rotation variables

Efficacité Maximum est atteinte lorsque la différence de hauteur est de 50m (pour une prof. de nappe de 50m)

BEP = Best Efficiency Point



UPSH : 2 aspects à étudier : impact et efficacité



Challenges/ Risques

Imperméabilisations/ stabilisation des parois ?

Effet de fatigue dans les roches ?

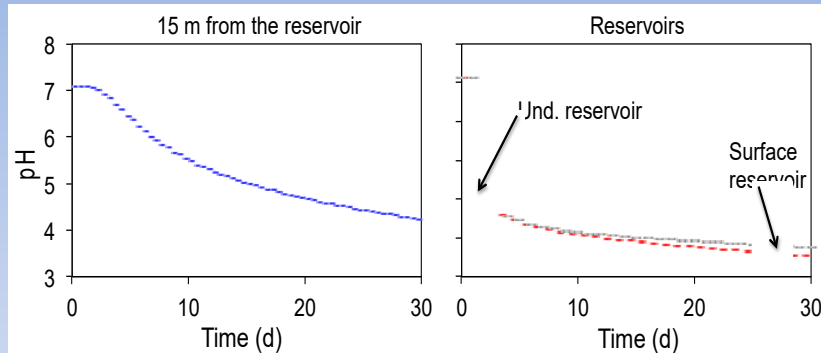
Gestion de l'air et de l'eau dans les espaces souterrains ouverts mais de géométries complexes?

Impacts hydrochimiques?

...



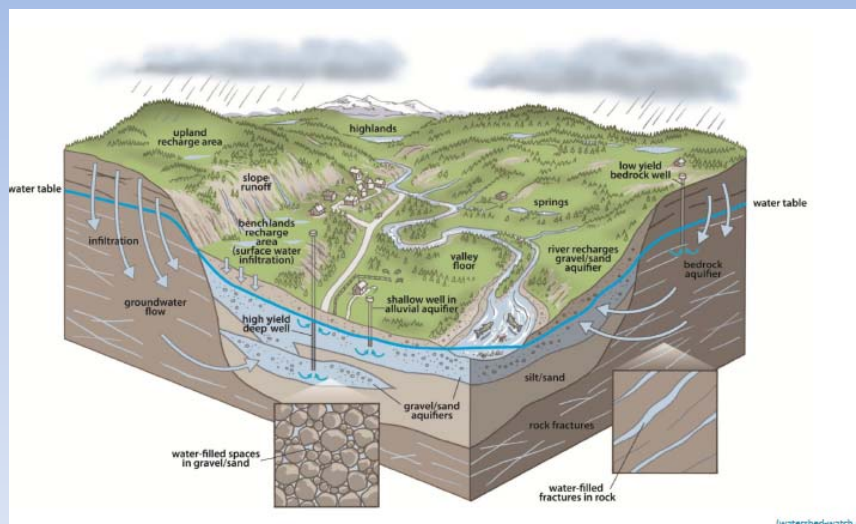
UPSH : 2 aspects à étudier : impact et efficacité



Impacts hydrochimiques:
 ... notamment changements de pH

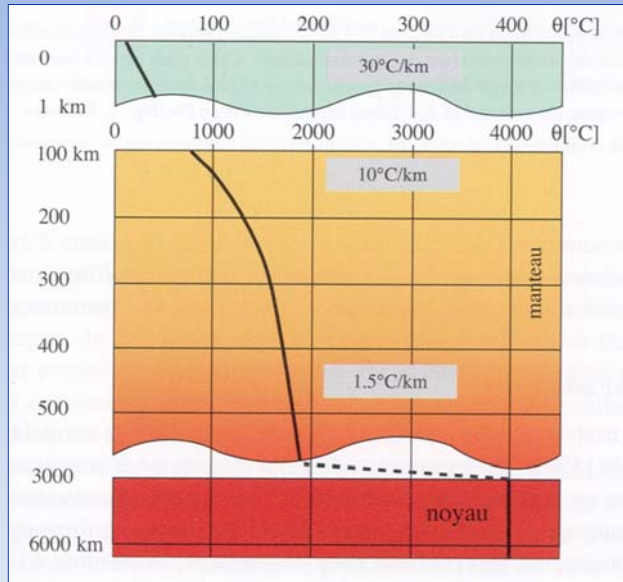
... à préciser au cas par cas !

Utiliser les aquifères pour exploiter/stocker de la chaleur ? pourquoi pas, mais ...



aquifères = formations géologiques perméables

Gradient géothermique



... environ
 $3^\circ / 100 \text{ m}$
(hors anomalie)

... en plus de la t°
moyenne annuelle
du lieu

Exemple:
chez nous on peut
espérer 27° à 500 m
($12^\circ + 15^\circ$)

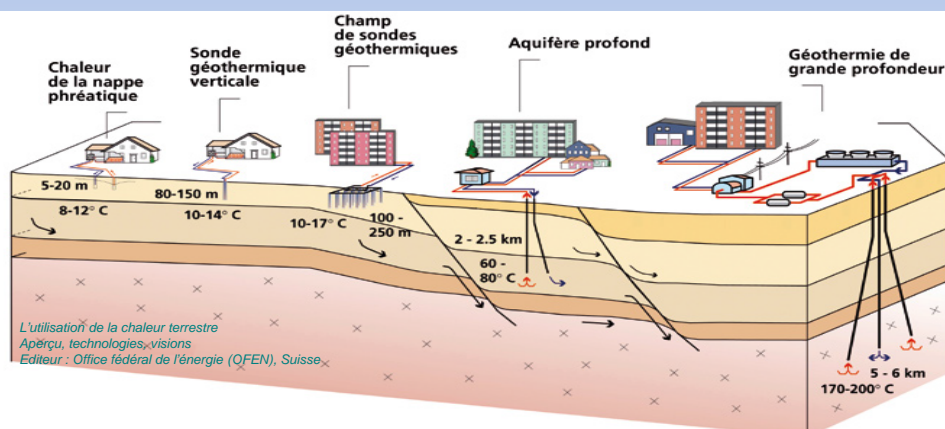
7

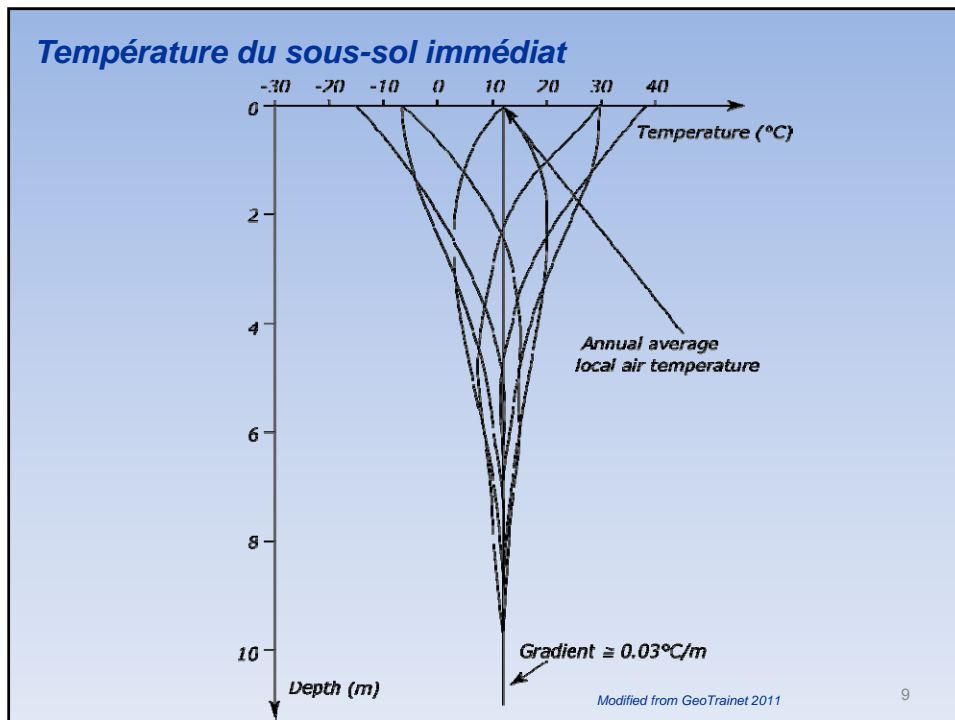
Différents types de géothermie...

mais pour le stockage:

- faible profondeur car forages + pompages
- qq dizaines de m

... géothermie de très basse température avec pompes à chaleur



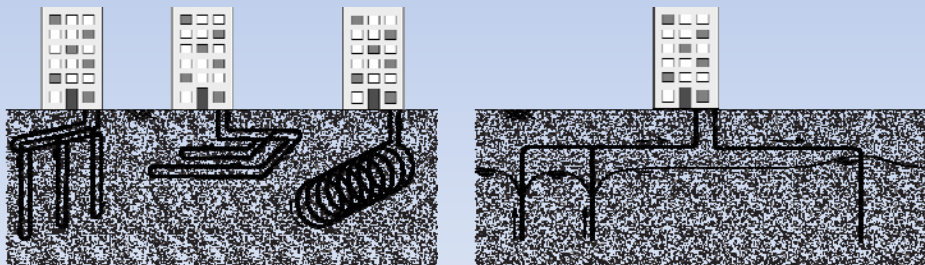


Systèmes de basse température :

- avec pompes à chaleur
- circuits 'ouverts' ou circuits fermés

Il faut étudier et quantifier :

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



Abbréviations communes

Générales

GHP = Ground Heat Pump system

GSHP = Ground Source Heat Pump system

SGE = Shallow Geothermal Energy

UTES = Underground Thermal Energy Storage

Systèmes fermés

BHE = Borehole Heat Exchanger

TRT = Thermal Response Test

BTES = Borehole Thermal Energy Storage

Systèmes ouverts

ATES = Aquifer Thermal Energy Storage

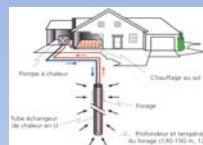
Outils

DTS or DTPS = Distributed Thermal (Perturbation) Sensing

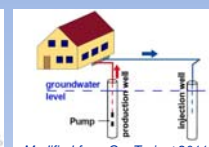
Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?

Critères de décision

- coût d'installation
- conditions du sous-sol
- impacts
- rendements



BTES



ATES

Modified from GeoTrainet 2011

Coûts d'installation:

**coûts circuits fermés > coûts circuits ouverts
sûrement pour puissances > 100 kW**

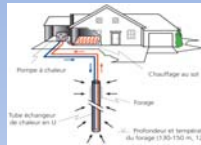
Conditions du sous-sol:

**grande conductivité hydraulique pour circuits
ouverts**

Impact: à étudier cas par cas

Rendement: à étudier cas par cas

Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?



BTES



ATES

Pour circuit ouvert

$$\text{Puissance: } P = \frac{Q \cdot \Delta T \cdot c_{\text{water}}}{\left(1 - \frac{1}{\text{COP}}\right)} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \text{°C} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \cdot \text{°C}} \right]$$

Pour circuit fermé

Puissance: système vertical : 40 à 60 W/m,
système horizontal: 24 W/m²

13

Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?

Dimensionnement pour puissance de 150 kW:

- si circuit fermé vertical (40 à 60 W/m)

... pour sous-sol à 12° et un COP de 3,5

45 forages de 65 à 70 m

- si circuit ouvert: pour eau souterraine à 12°

2 forages avec pompage de 21 m³/h

frais d'installation environ 10x moins chers !

Dimensionnement pour un hôpital (500-600kW):

- doublet avec 2 puits pour production de 90 m³/h (diamètre 25cm) ... au lieu de 80 forages à 150 m ? à 50W/m = 630kW

frais d'installation environ 30x moins chers !

Pour grandes puissances, quand il y a moyen, avantage net aux systèmes ouverts (ATES)

14

Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?

+ tenir compte de l'énergie nécessaire au pompage (si zone saturée du sous-sol est profonde)

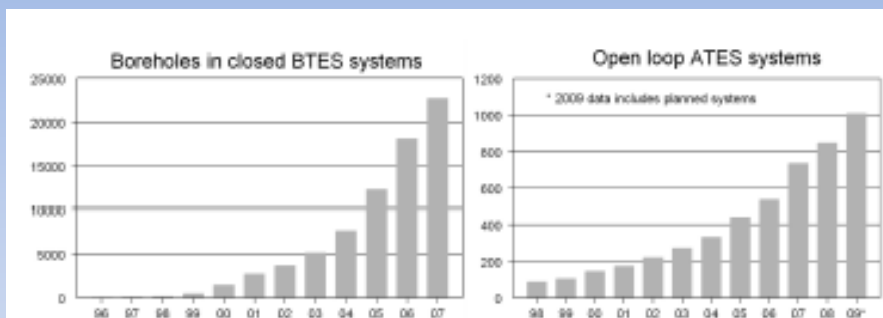
+ pertes de rendement dues à la qualité des ESO et des phénomènes d'encrassement/précipitations dans l'échangeur ...utilisation d'un 'échangeur intermédiaire' sans doute remplaçable ou facilement 'nettoyable' placé avant l'échangeur (pompe à chaleur) principal

+ frais d'études plus approfondies sur les conditions hydrogéologiques du sous-sol

15

Chez nos voisins ?

→ BTES et ATEs aux Pays-Bas jusqu'en 2009



Bonte et al. 2011

16

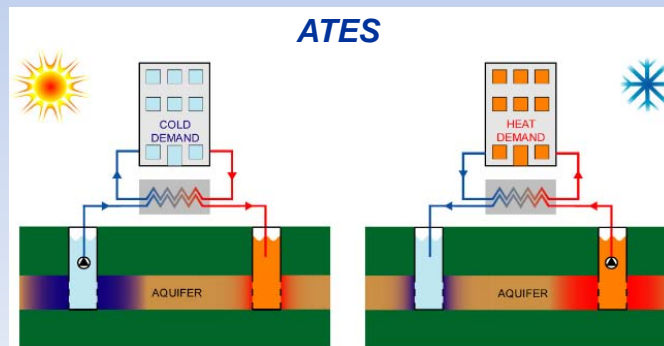
Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?

➔ Injection et pompage dans une couche géologique

Les potentialités sont en principe grandes ...

... mais à vérifier en pratique

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



Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?

➔ Efficacité et impact sont très liés : optimisation nécessaire

Efficacité

- 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 et donc ... une faible conductivité hydraulique)

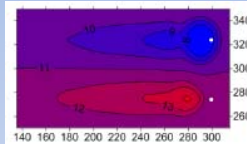
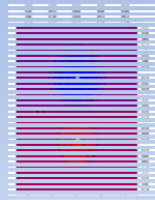
Impact

- 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

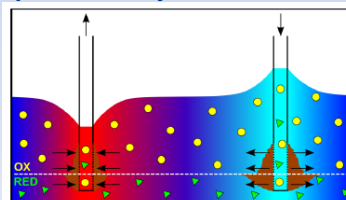
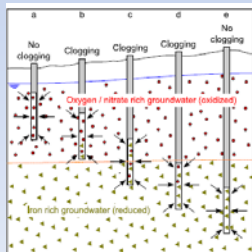
Aspects hydrodynamiques

- 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

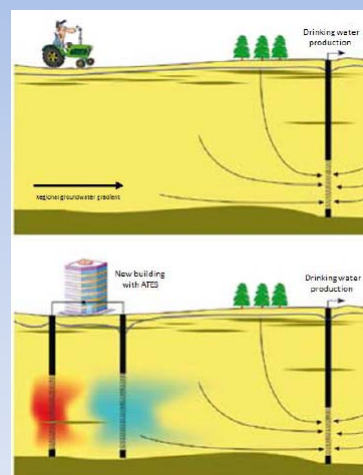


19

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

... nécessaires également pour le 'permitting'

- seuls quelques sites correspondent aux circonstances hydrogéologiques qui conviennent
- calculer rigoureusement les rabattements induits et remontées
- calculer rigoureusement les impacts potentiels au niveau 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



20

Que faire ?

bien comprendre, mesurer, caractériser et modéliser le système souterrain

(1) Conduction thermique

... est le 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 λ_b est la conductivité thermique [$W/(m \cdot K)$] du milieu poreux (i.e. solide + eau)

- 0.2 $W/(m \cdot K)$ pour des sédiments secs
- 4.5 $W/(m \cdot K)$ pour un grès saturé
- 0.60 $W/(m \cdot K)$ pour l'eau

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

21

Valeurs de conductivité thermique

| Lithology* | λ_b ($Wm^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|-------------------------------------|--|
| granite and gneiss | 3.2 – 4.4 |
| basalt | 3.0 – 3.5 |
| quartzite | 4.0 – 6.5 |
| shales | 1.5 – 3.5 |
| schists and slates | 1.3 – 3.0 |
| limestone and dolomite (karstified) | 2.5 – 4.5 |
| chalk | 1.5 – 2.5 |
| sandstone | 2.5 – 5.0 |
| siltstone | 2.0 – 4.0 |
| volcanic tuff | 1 – 1.5 |
| gravels | 2.5 – 4.5 |
| sands | 3.0 – 5.5 |
| silts | 2.0 – 4.0 |
| loams, loess and clays | 2.0 – 3.0 |
| air | 0.024 – 0.026 |
| water | 0.57 – 0.60 |
| organic matter | 0.25 – 0.40 |

* values for dry conditions (i.e., with air in the pores and fissures). Saturated or partially

saturated values will be slightly greater according to the water content and resulting from the

difference in the thermal conductivities of water and air. Data obtained from local rocks

should be privileged for detailed calculations of geothermal systems.

22

Que faire ?

bien comprendre, caractériser et modéliser le système souterrain

(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/m² ou J/(s.m²)] :**

$$\rho_w c_w q T$$

où ρ_w est la densité de l'eau [kg/m³], c_w est la capacité thermique de l'eau [J/(kg°K)], q est le flux de Darcy [m/s].

23

Que faire ?

bien comprendre, mesurer, caractériser et modéliser le système souterrain

(3) Dispersion thermique

**inférieure à la dispersion d'un soluté ...
le flux de dispersion [W/m² ou J/(s.m²)] :**

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

où ρ_b est la densité [kg/m³] 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 !

24

Valeurs de capacité thermique

| Lithology* | c_b ($Jkg^{-1} \cdot K^{-1}$) | $\rho_b c_b$ ($Jm^{-3} \cdot K^{-1}$) |
|------------------------|-----------------------------------|---|
| granite and gneiss | 0.74 - 0.79 10^3 | 2 - 2.1 10^6 |
| basalt | 0.79 - 0.86 10^3 | 2.1 - 2.3 10^6 |
| quartzite | 0.70 - 0.75 10^3 | 1.85 - 1.95 10^6 |
| shales | 0.89 - 1.11 10^3 | 2.5 - 3.0 10^6 |
| schists and slates | 0.71 - 1.11 10^3 | 2.0 - 3.0 10^6 |
| limestone and dolomite | 0.80 - 0.91 10^3 | 2.2 - 2.5 10^6 |
| chalk | 0.90 10^3 | 2.2 - 2.25 10^6 |
| sandstone | 0.74 - 0.92 10^3 | 1.63 - 2.2 10^6 |
| siltstone | 0.79 - 0.88 10^3 | 2.0 - 2.2 10^6 |
| volcanic tuff | 0.2 10^3 | 0.2 - 0.5 10^6 |
| gravels | 1.0 - 1.5 10^3 | 1.3 - 2.0 10^6 |
| sands | 0.80 - 0.96 10^3 | 1.5 - 2.1 10^6 |
| silts | 0.8 - 1.1 10^3 | 1.7 - 2.3 10^6 |
| loams, loess and clays | 1.1 - 2.1 10^3 | 2.3 - 4.2 10^6 |
| air | 1.005 10^3 | 1.25 |
| water | 4.18 10^3 | 4.18 10^6 |
| organic matter | 1.93 10^3 | 2.51 10^6 |

* values for dry conditions (i.e., with air in the pores and fissures). Saturated or partially saturated values will be greater according to the water content and resulting from the huge difference in the thermal capacity values of water and air. Data obtained from local rocks should be privileged for detailed calculations of geothermal systems.

25

Que faire ?

bien comprendre, caractériser et modéliser le système souterrain

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

W/m^3 ou $J/(s \cdot m^3)$

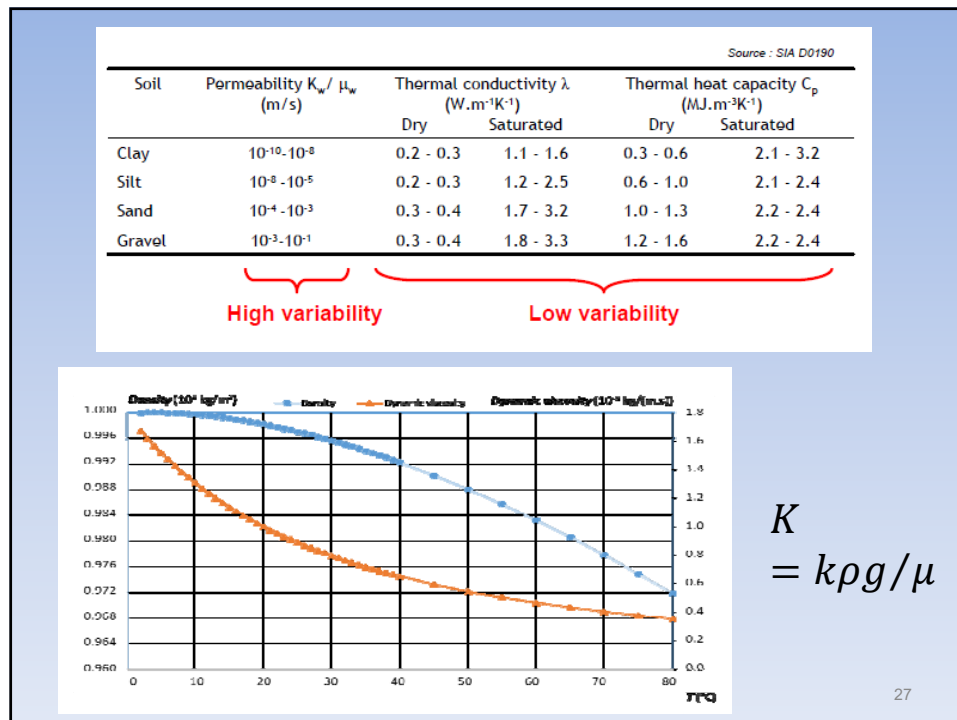
ou

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

convection

diffusion incluant
majoritairement la conduction

26



Modélisations préalables, puis modélisations calibrées sur essais permettant de:

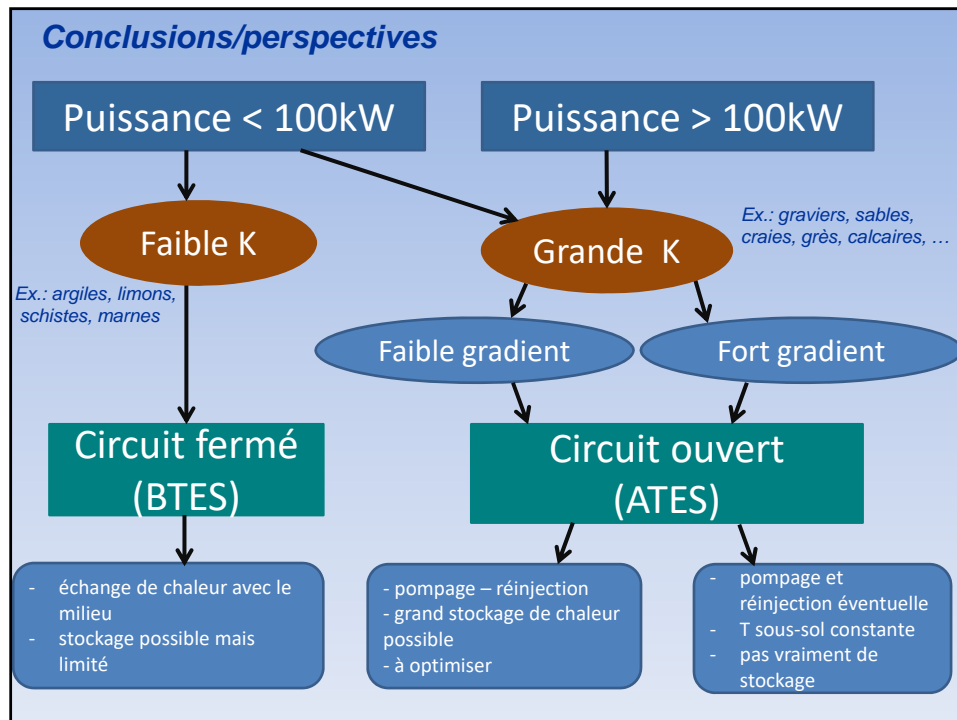
- 1) Tester et optimiser doublet géothermique
- 2) Calculer rabattements et remontées dans les environs
- 3) Evolution de la température de l'eau dans l'aquifère (et pompée) à court, moyen et long terme
- 4) Modèle couplé de transport réactionnel: simulation des éventuels processus de 'clogging' et effets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

Essais sur le terrain

- pour BTES: TRT (Thermal Response Test) + caractérisation sous-sol + bilan thermique
- pour ATES: essais de pompages et essais de traçages thermiques + bilan thermique

'Permitting' / autorisations

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



URGENCE en RW

- **Meilleure prise en compte des conditions du sous-sol par les acteurs**
- **Meilleure prise en compte des spécificités d'un pompage pour des applications géothermiques par les autorités**

Merci !

30

Suppléments d'informations

Références

Publications internationales

Hermans Th., Nguyen F., Klepikova M., Dassargues A. and J. Caers, 2018. Uncertainty quantification of medium-term heat storage from short-term geophysical experiments, *Water Resources Research*, 54: 2931-2948. <https://doi.org/10.1002/2017WR022135>

Klepikova M., Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T., Nguyen F., Brouyere S. and Dassargues A., 2016, Heat tracer test in an alluvial aquifer: field experiment and inverse modelling, *Journal of Hydrology*, 540, pp. 812-823. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.066>

Hermans T., Wildemeersch S., Jamin P., Orban P., Brouyère S., Dassargues A. and Nguyen F., 2015, Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT, *Geothermics*, 53, pp. 14-26. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650514000376>

Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T., Nguyen F., Brouyère S. & Dassargues A., 2014, Coupling heat and chemical tracer experiments for estimating heat transfer parameters in shallow alluvial aquifers, *Journal of Contaminant Hydrology*, 169, pp.90-99. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772214001247#>

Publication nationale

Fossoul, F., Orban, P. & Dassargues, A., 2011, Numerical simulation of heat transfer associated with low enthalpy geothermal pumping in an alluvial aquifer, *Geologica Belgica*, 14(1-2), pp. 45-54. <http://popups.ulg.ac.be/Geol/document.php?id=3212>

31

Suppléments d'informations

Références

Chapitres de livres

Dassargues A. 2018, Heat transfer in aquifers and shallow geothermy. Chap.11, In: *Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering*, in press.

Dassargues A., Wildemeersch S., 2014, Géothermie de très basse température, in *Watervoerende lagen & grondwater in België – Aquifères & eaux souterraines en Belgique*, Partie 2, Chapitre 6, pp. 375-381. Academia Press.

Conférence sur Invitation

KULeuven, Meet the jury Conference, 'Hydrothermal characterization of an alluvial aquifer by heat and solute tracer tests', 27/11/2013.

Congrès

Dassargues A. 2018. La double porosité de la craie : influence sur le transport de solutés et de chaleur, 22èmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues: Hydrogéologie de la craie', Le Havre, 24-25 mai 2018. <http://hdl.handle.net/2268/221513>

Klepikova M., Jamin P., Orban Ph., Brouyère S. and Dassargues A., 2016, How heterogeneity of the K-field influences a heat plume in a shallow alluvial aquifer: responses from a heat tracer test, 5th International Geologica Belgica Meeting (GB2016) in Mons January 26-29 2016, S9: Reservoir I: Hydraulic and thermal properties of rocks. p.77. <http://hdl.handle.net/2268/192394>

32

Références (suite)

Congrès

Klepikova M., Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T., Nguyen F., Brouyère S. and Dassargues A., 2016, Heat tracer test in an alluvial aquifer: field experiment and inverse modelling, Abstract EGU2016-6188, Session HS8.2.5/ERE5.5 Thermal and mechanical processes and energy storage in porous and fractured aquifers. <http://hdl.handle.net/2268/195219>

Hermans T., Jamin P., Wildemeersch S., Klepikova M., Orban P., Brouyère S., Dassargues A. and Nguyen F., 2016, Comparison of temperature from DTS and ERT with direct measurements during heat tracer experiment in heterogeneous aquifer, IAH Congress 2016 Montpellier. <http://hdl.handle.net/2268/202072>

Klepikova M.V., Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T., Nguyen F., Brouyère S. and Dassargues A., 2015, Use and utility of combined solute and heat tracer tests for characterizing hydrogeothermal properties of an alluvial aquifer, CBH-BCH, Belgian National IAH Chapter Study Day on Geothermy, Mons, June 5, 2015. <http://hdl.handle.net/2268/182626>

Dassargues A., Klepikova M., Jamin P., Orban Ph., Brouyère S., 2015, Heat and solute tracer tests in an alluvial aquifer : field experiment and inverse modelling, AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, Session H51F Abstract 1438, 14-18 December, <http://hdl.handle.net/2268/193004>

Wildemeersch, S., Klepikova, M., Jamin, P. Orban, P., Hermans, T., Brouyère, S., and Dassargues, A., 2014, Thermal tracer tests for characterizing a shallow alluvial aquifer, EGU General Assembly 2014, Vienna, 28 April 2014, HS8.2.5: Thermal and mechanical processes and energy storage in porous and fractured aquifers: poster paper EGU 2014-11169. <http://hdl.handle.net/2268/171023>

Klepikova M., Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T. Brouyère S. and Dassargues A., 2014, A heat and dye tracer test for characterizing and modelling heat transfer in an alluvial aquifer, 7th International Groundwater Symposium, 22-24 September 2014 - Perugia – Italy. <http://hdl.handle.net/2268/176622>

33

Références (suite)

Congrès (suite)

Wildemeersch S., Jamin P., Orban Ph., Hermans T., Brouyère S. & Dassargues A., 2013, Coupling heat and salt tracer experiment for the estimation of heat transfer and solute transport parameters, 8th IAHS International Groundwater Quality Conference (GQ13), University of Florida, Gainesville, 21-26/04/2013, Abstract Book, p.60.

Wildemeersch S., Orban P., Hermans T., Brouyère S. and Dassargues A., 2013, Heat transfer characterization in a shallow aquifer using heat and dye tracer tests, Knowledge for the future, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly Gothenburg, 22-26 July 2013, IAHS Symposium Hw08 - Subsurface warming, heat energy and groundwater.

Hermans T., Wildemeersch S., Jamin P., Orban P., Brouyère S., Dassargues A., Nguyen F., 2013, A heat injection and pumping experiment in a gravel aquifer monitored with crosshole electrical resistivity tomography, EarthDoc - Near Surface Geosciences 2013 - 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Bochum 9-11 september 2013.

Dassargues A., Wildemeersch S., Jamin P., Orban P., Hermans, T. and Brouyère S., Heat transfer characterization using heat and solute tracer tests in a shallow alluvial aquifer, AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, Session H51D Abstract 1209, 9-13 December.

Fossoul, F., Orban, P. and Dassargues, A., 2010, Modelling groundwater pumping and coupled heat transport in a alluvial aquifer: tests using different codes an optimisation, in XVIII International Conference on Computational Methods in Water Resources, CMWR 2010, J. Carrera (Ed), CIMNE, Barcelona 2010.

34

Applications – Ardoisière de Martelange

- Réservoir inférieur: 400 000 m³ (hyp. réaliste)
Débit de 22.2 à 66.6 m³/s

- Chute moyenne de 215 m
100 m topo et 75-150 m dans la cavité

→ **Energie/cycle turbinage:**
234.4 MWh



Applications – Ardoisière de Martelange

« cavité souterraine » : ardoisière de Martelange

Conclusions des études d'application:

- Connections entre chambres

→ Impact important sur stabilité des piliers

- Echanges avec la nappe limités

→ Site a priori intéressant MAIS
nécessité de mieux connaître état et
géométrie des cavités

