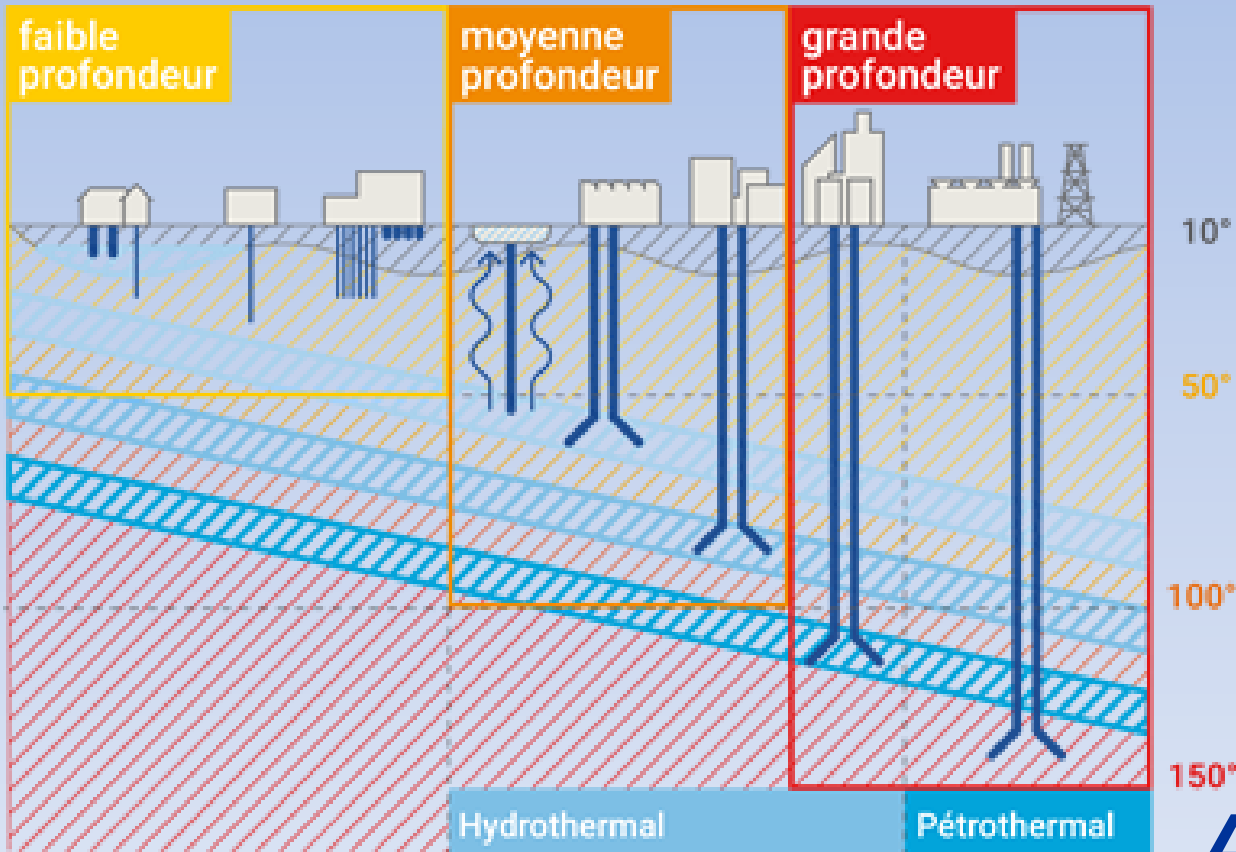
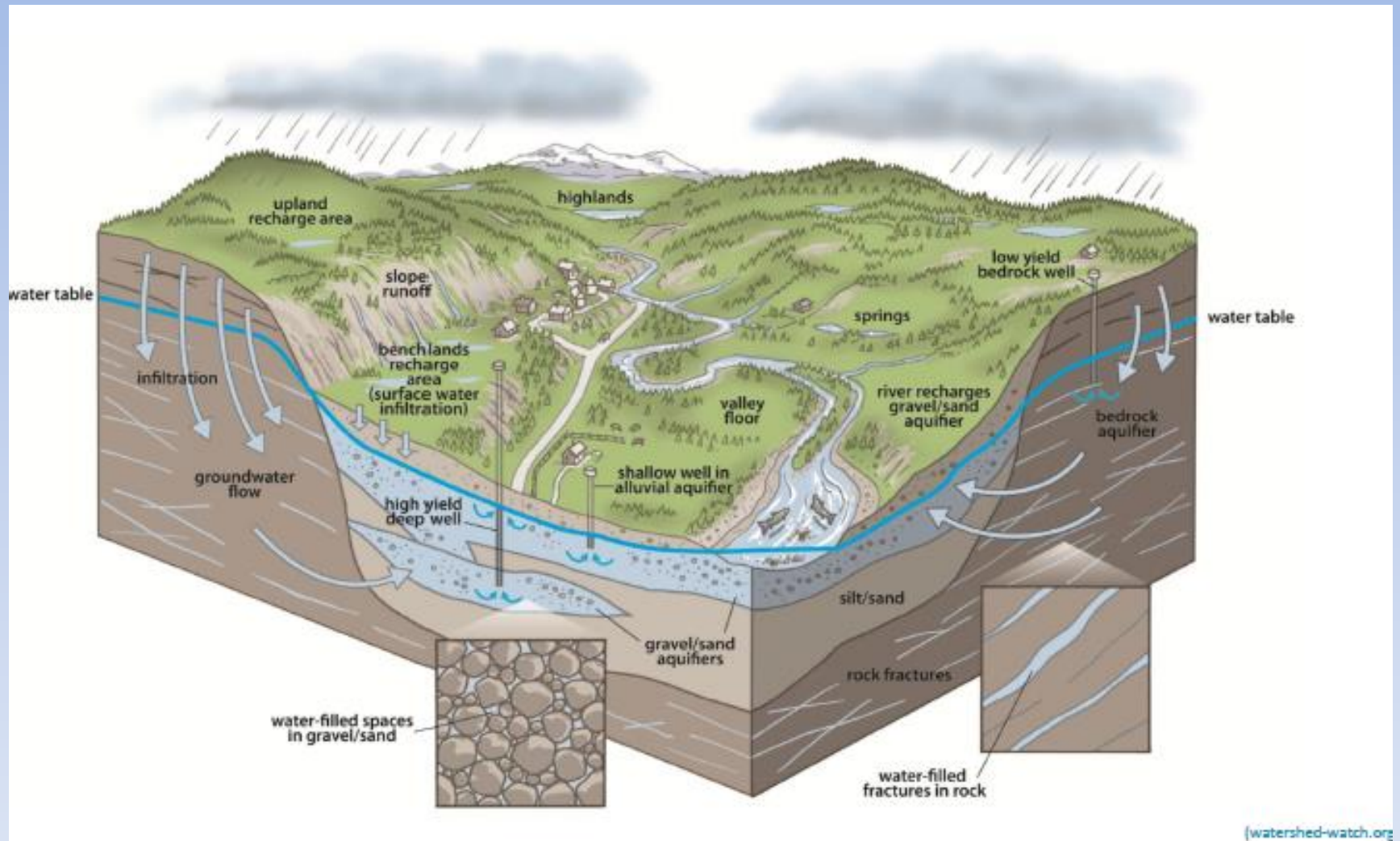


Avantages et contraintes des différents types de géothermie peu profonde liés aux conditions géologiques et hydrogéologiques



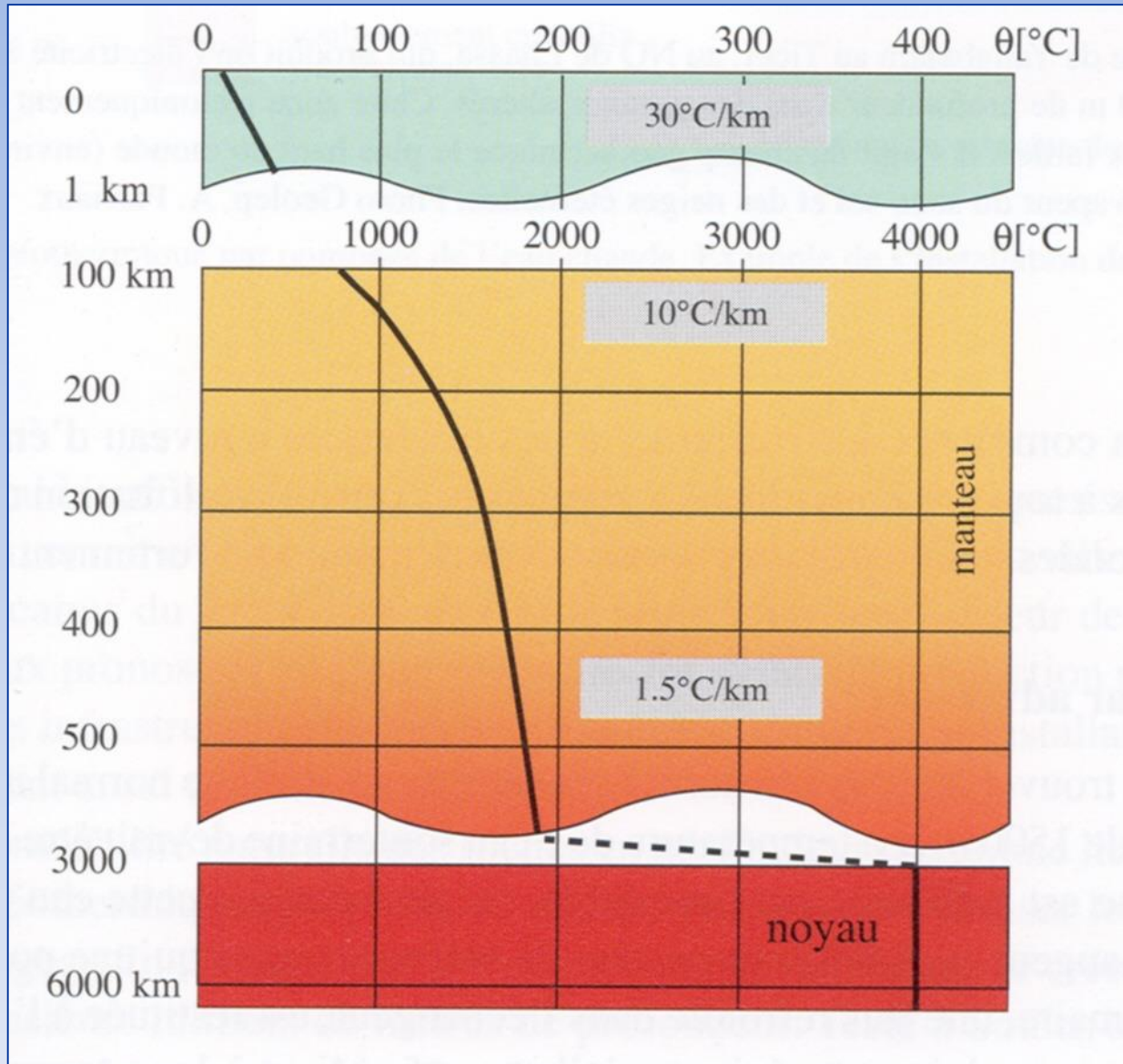
A. Dassargues
Ingénieur Géologue

Utiliser le sous-sol pour exploiter/stocker de la chaleur ? pourquoi pas, mais ...



aquifères = formations géologiques perméables

Gradient géothermique

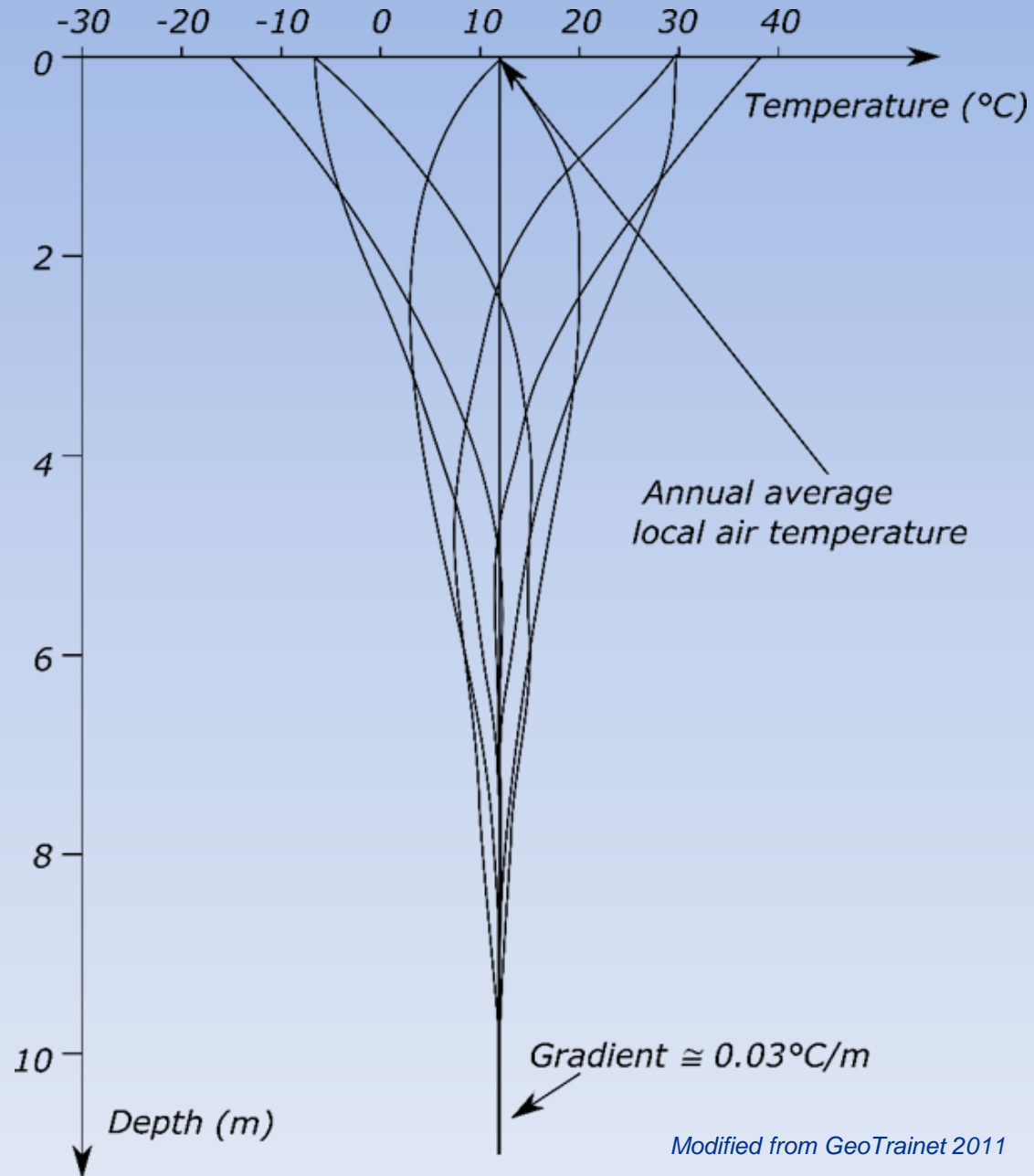


**... environ
 $3^{\circ} / 100 \text{ m}$
(hors anomalie)**

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

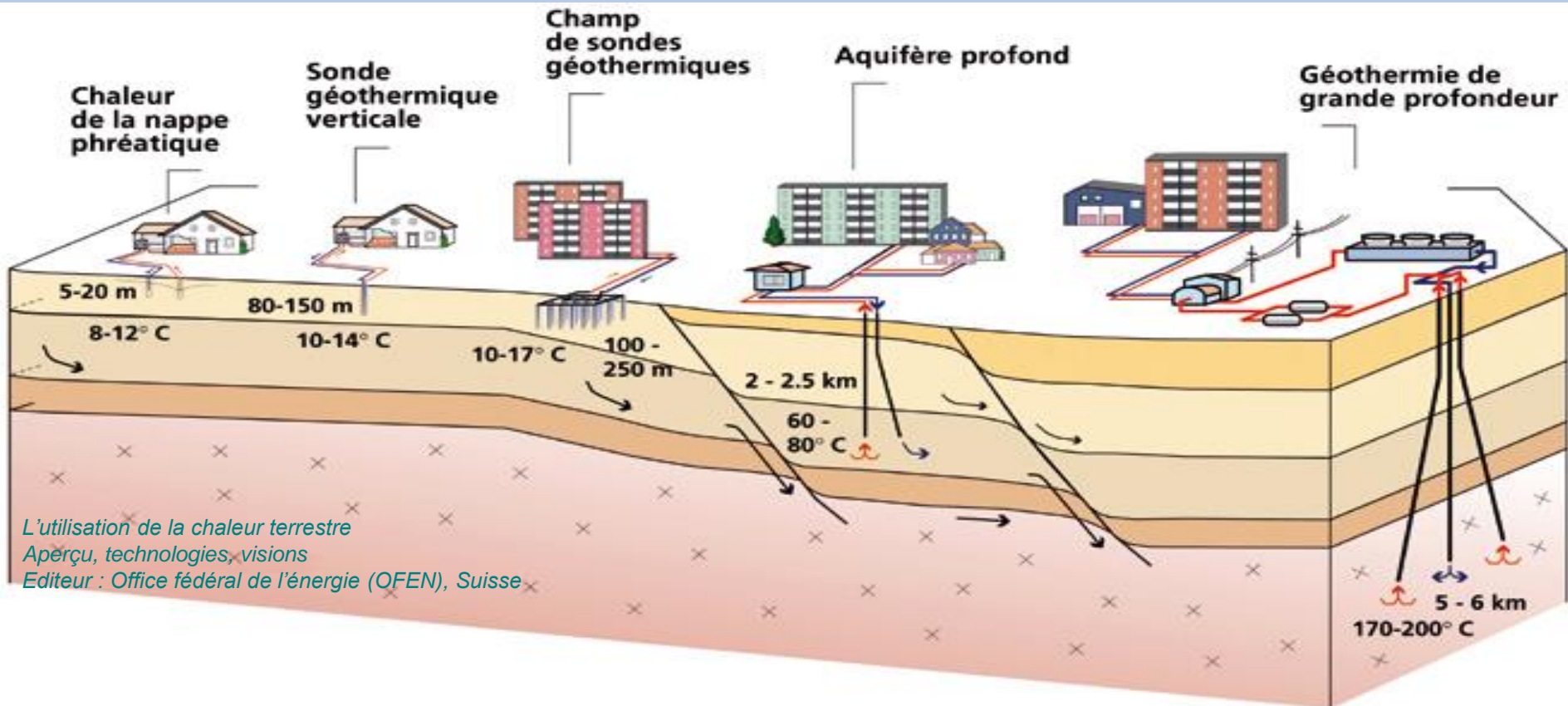
**Exemple:
chez nous on peut
espérer 27° à 500
m ($12^{\circ} + 15^{\circ}$)**

Température du sous-sol immédiat



Différents types de géothermie...

- de qq dizaines de m... géothermie de très basse température avec pompes à chaleur
- ...
- à des km de profondeur



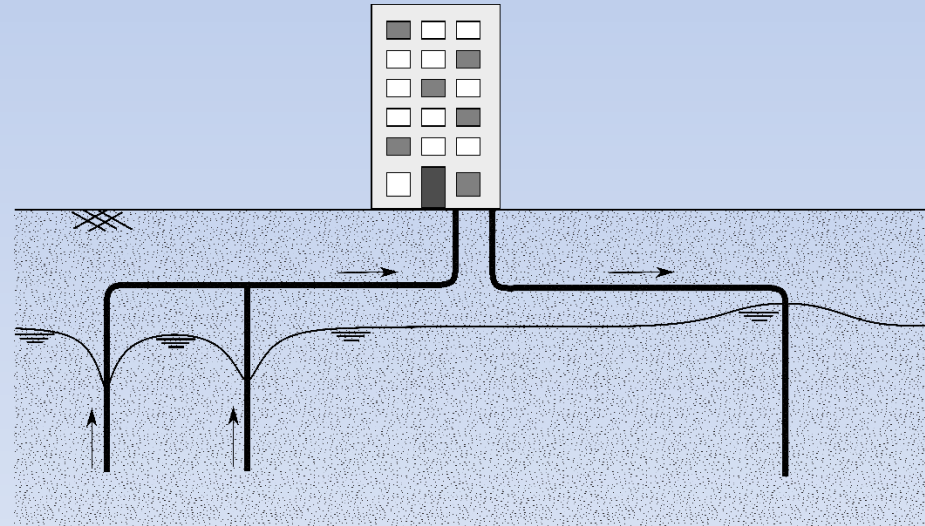
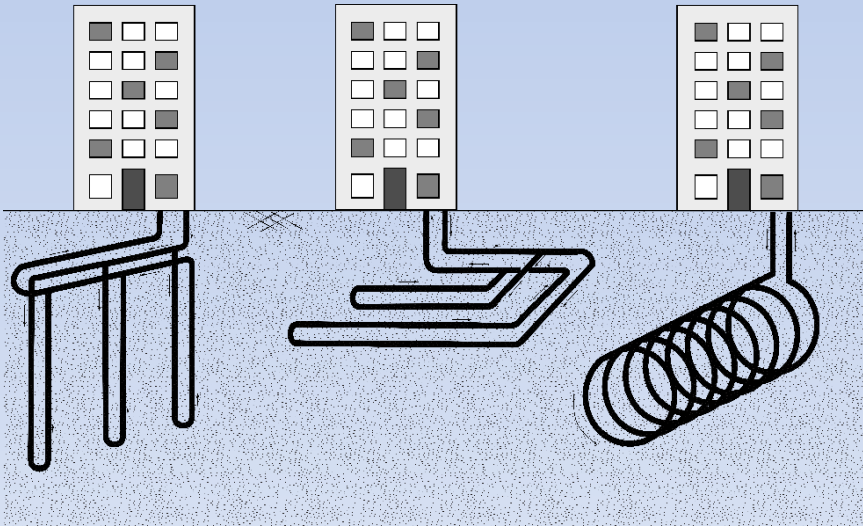
L'utilisation de la chaleur terrestre
Apèrçu, technologies, visions
Editeur : Office fédéral de l'énergie (OFEN), Suisse

Systemes de basse température :

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

Il faut étudier et quantifier :

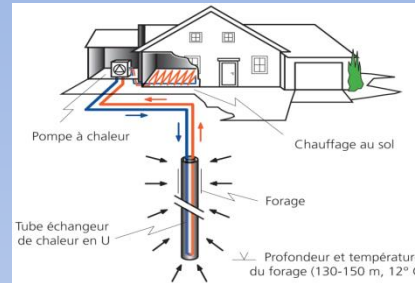
- ***les impacts sur le milieu***
- ***l'efficacité (rendements) du système à court, moyen et long termes***



Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?

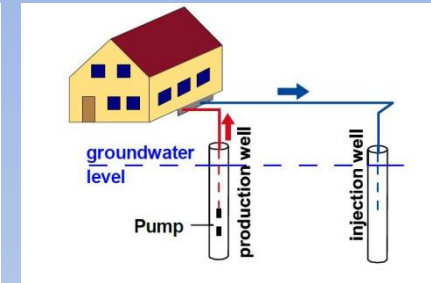
Critères de décision

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



BTES

Modified from GeoTrainet 2011



ATES

Coûts d'installation:

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

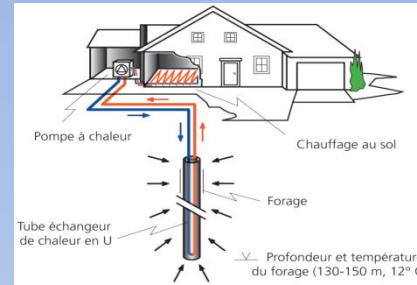
Conditions du sous-sol:

**grande conductivité hydraulique pour circuits
ouverts**

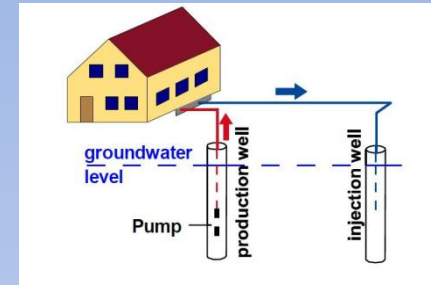
Impact: à étudier cas par cas

Rendement: à étudier cas par cas

Circuits 'ouverts' ou circuits 'fermés' ?



BTES



ATES

Modified from GeoTrainet 2011

Pour circuit ouvert

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

Pour circuit fermé

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

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)

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***

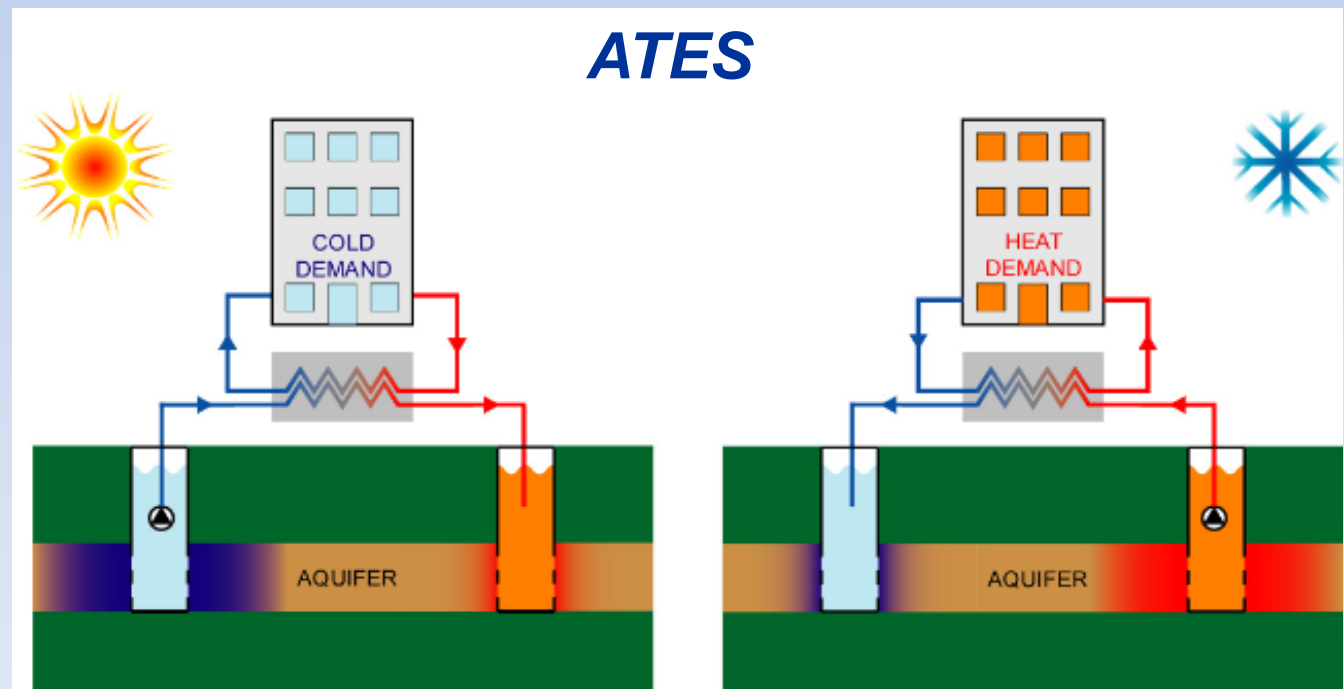
Utiliser les aquifères pour stocker de la chaleur ?

➔ *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)*

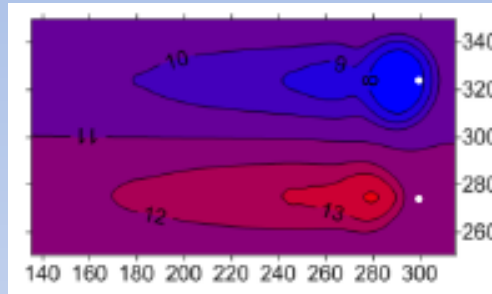
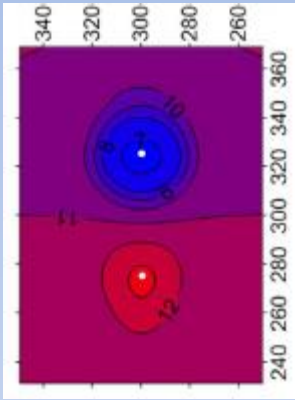
Impact

- *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

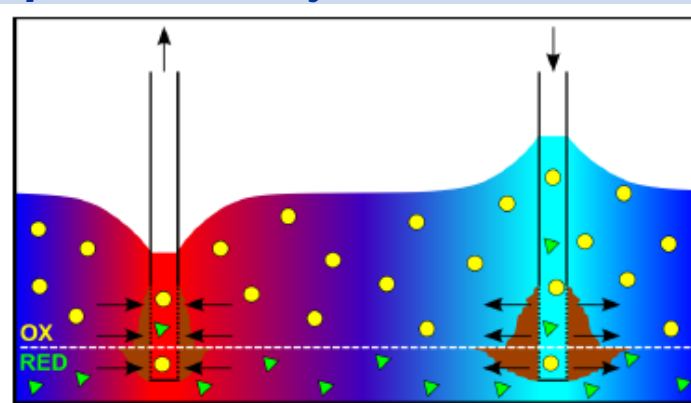
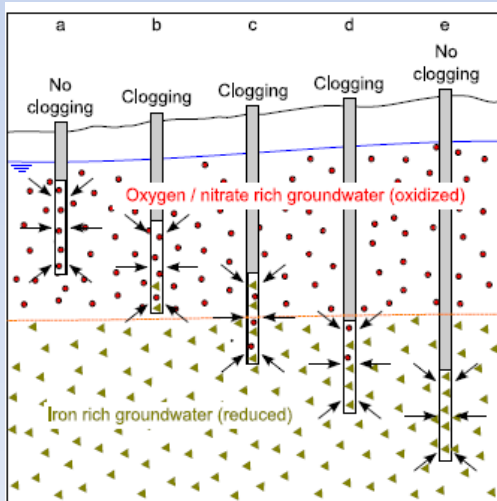
Aspects hydrodynamiques

- 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



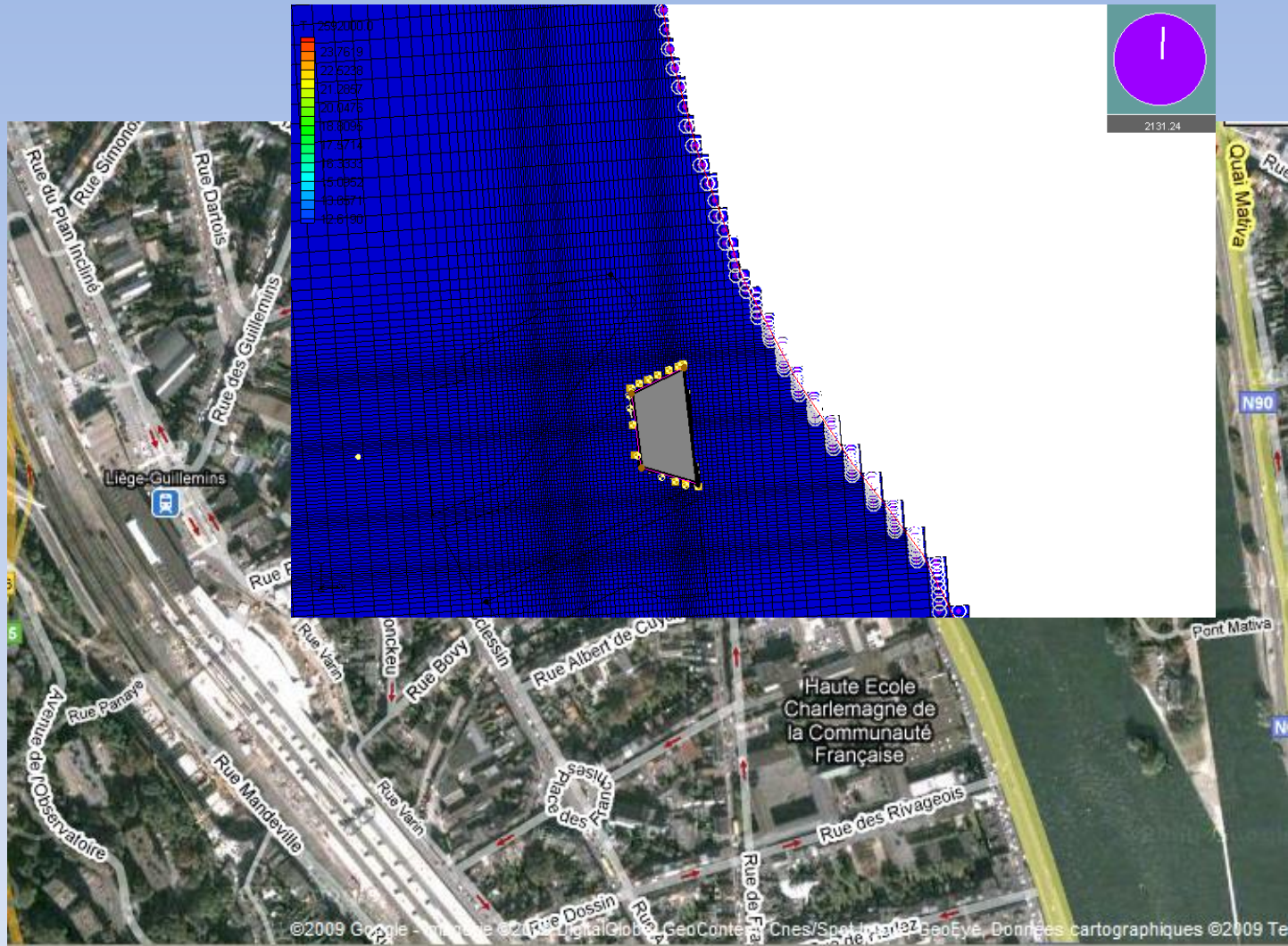
Aspects hydrochimiques

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



(Possemiers, 2014)

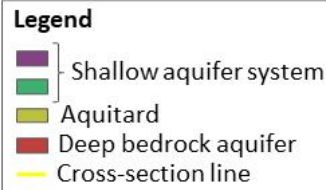
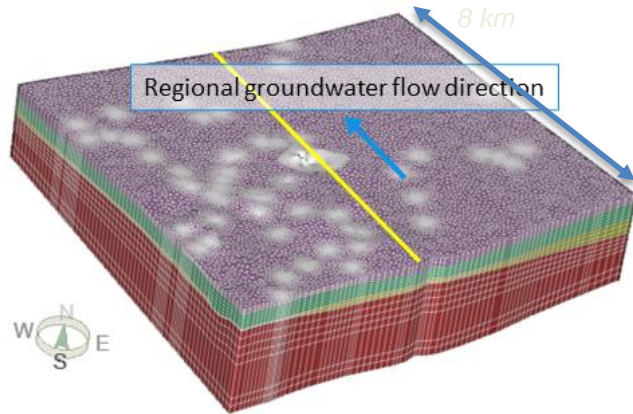
Caractérisation et modélisation préalables : exemple



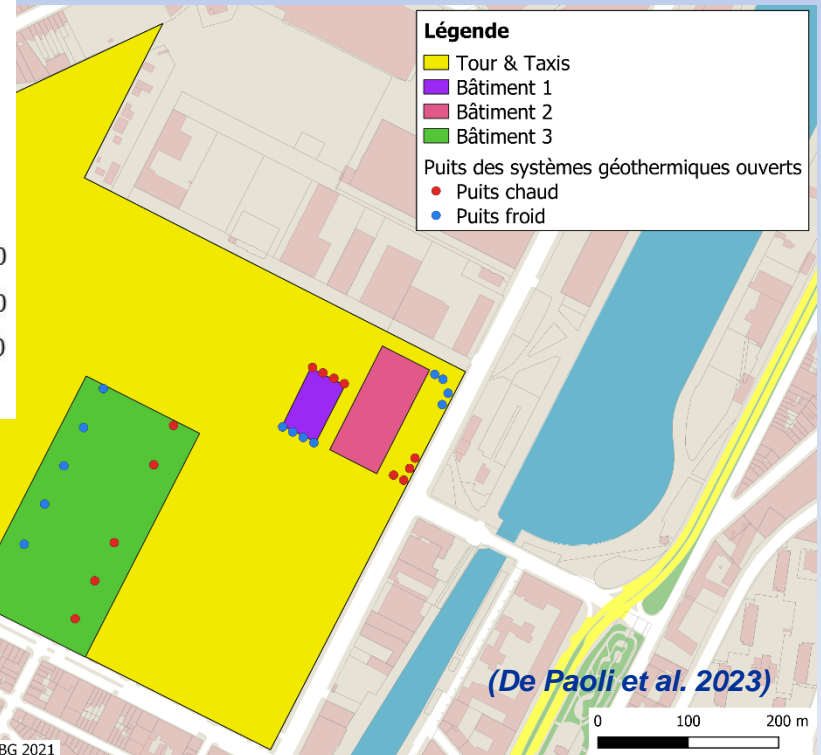
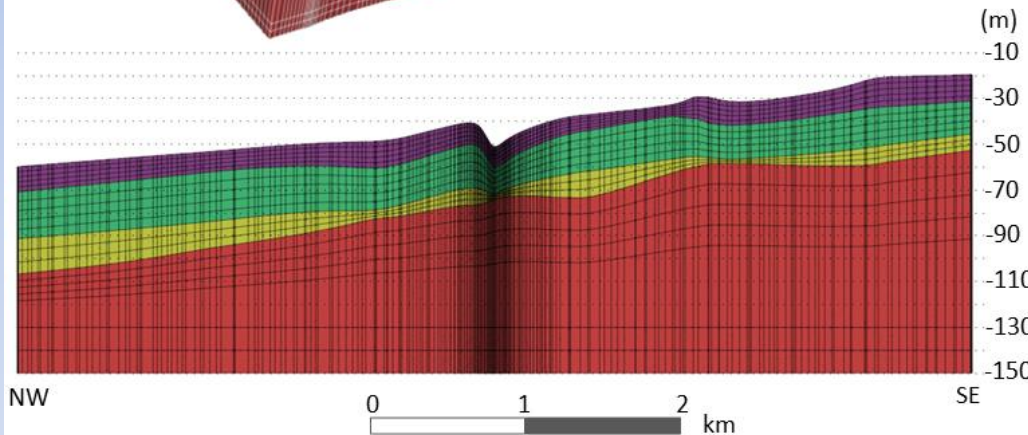
Caractérisation et modélisation préalable

➔ **Efficacité et impact sont très liés : optimisation**

nécessaire

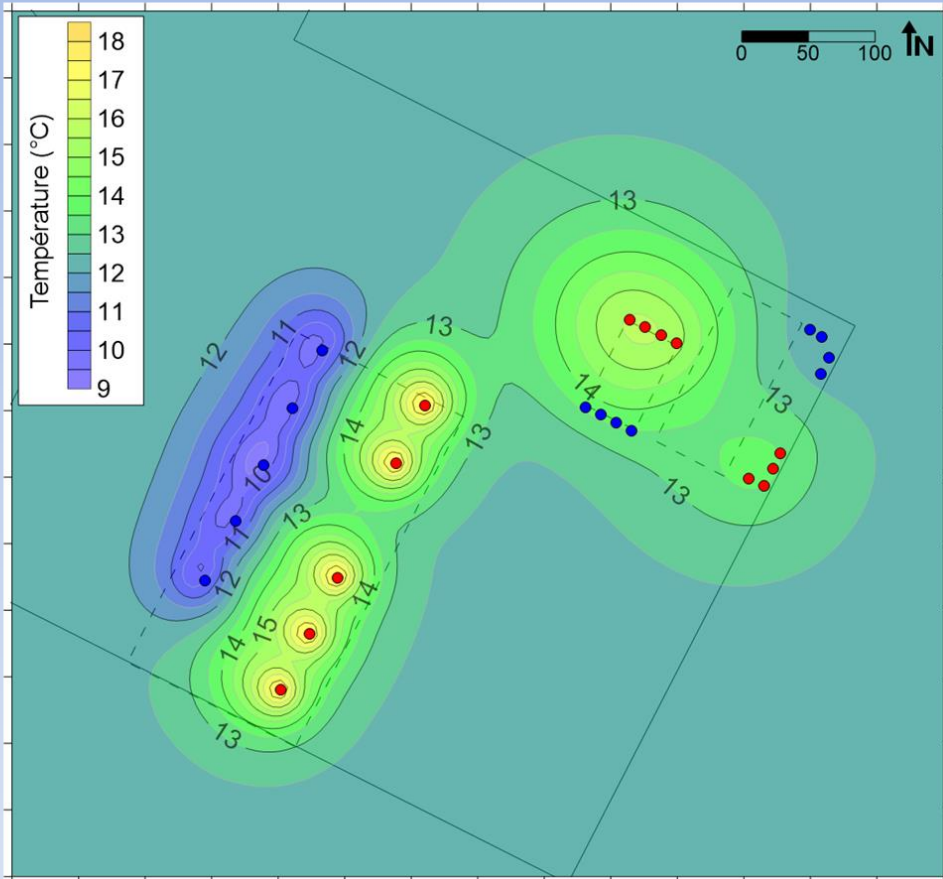
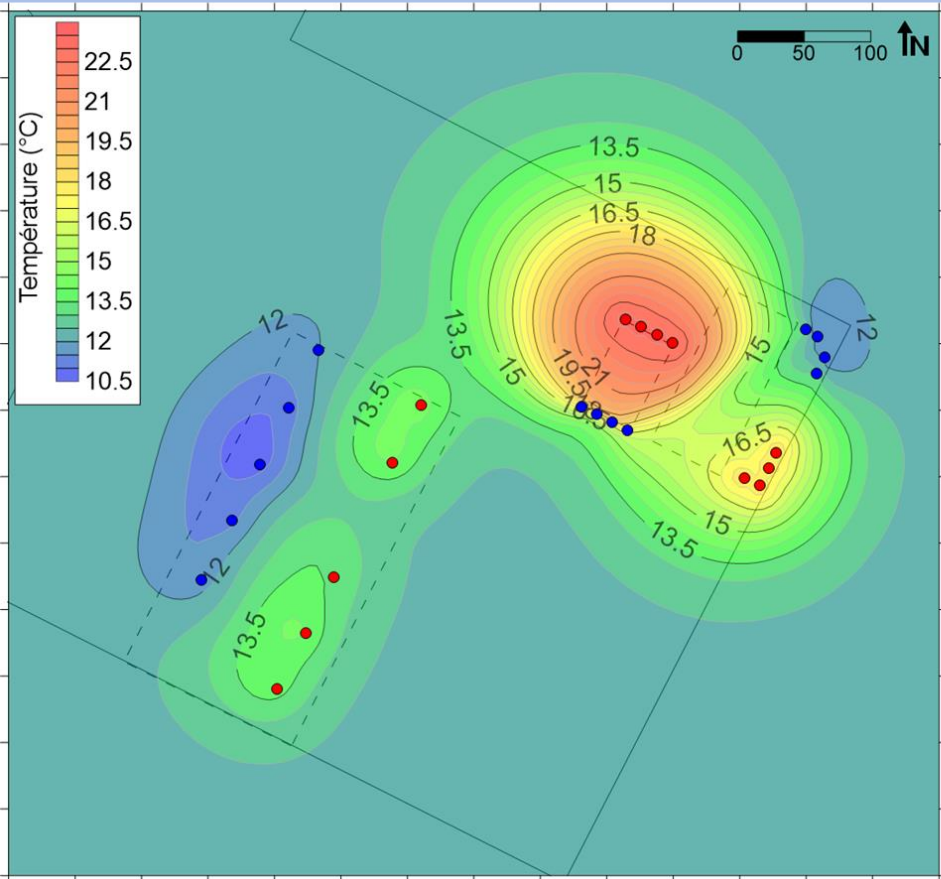


(De Paoli et al. 2023)



(De Paoli et al. 2023)

1^{er} octobre 2039



Aquifère supérieur

Aquifère inférieur

Efficacité et impact : optimisation nécessaire

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

... nécessaires également pour le 'permitting'

- ***vérifier si circonstances hydrogéologiques 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***

Conclusions/perspectives

Puissance < 100kW

Puissance > 100kW

Faible K

Grande K

Ex.: graviers, sables, craies, grès, calcaires, ...

Ex.: argiles, limons, schistes, marnes

Faible gradient

Fort gradient

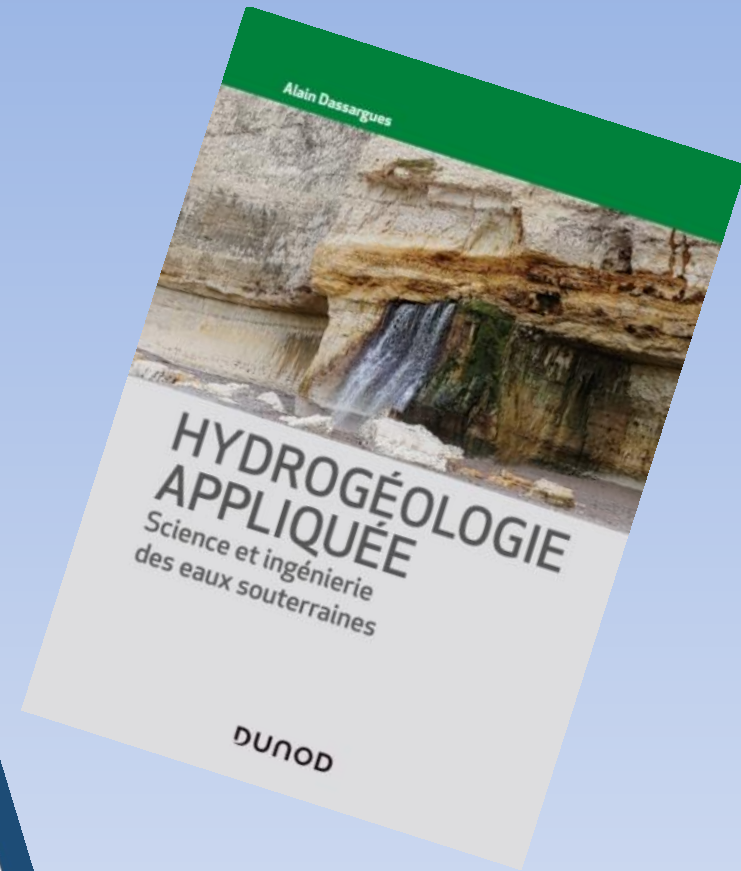
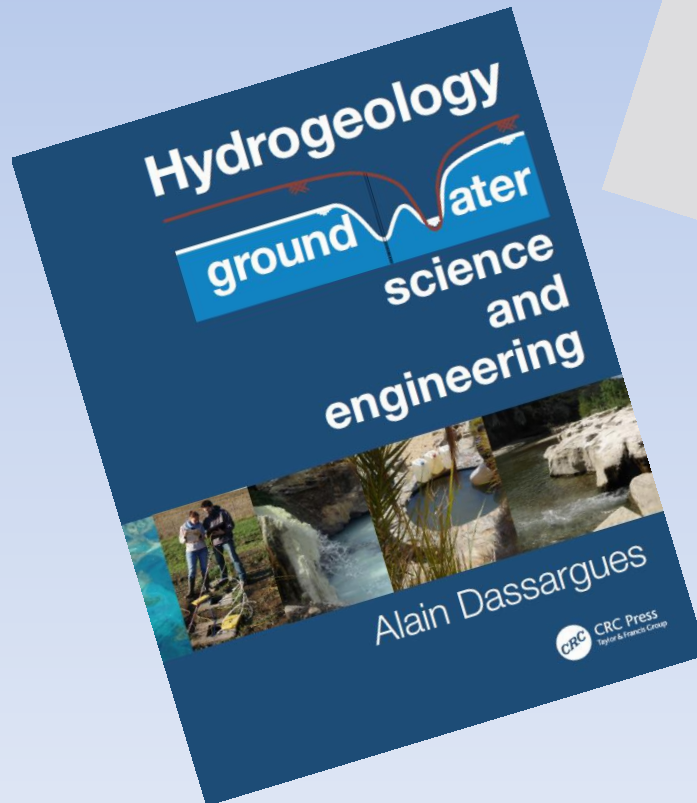
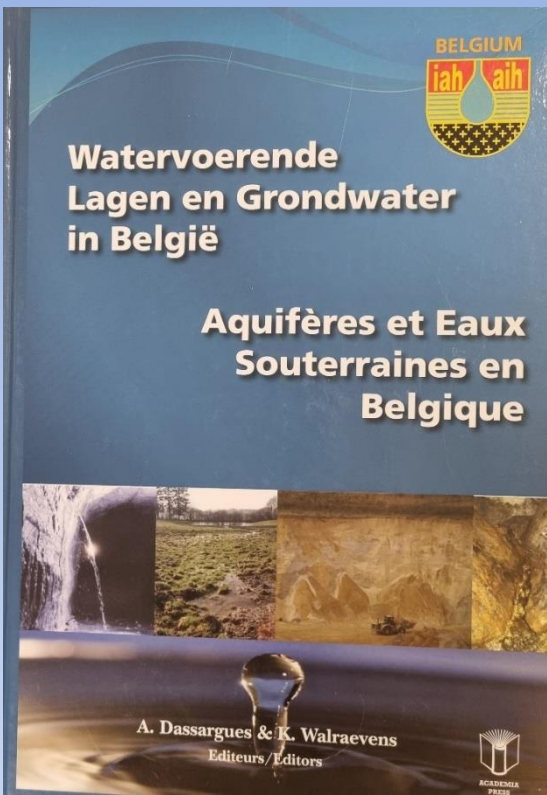
Circuit fermé
(BTES)

Circuit ouvert
(ATES)

- échange de chaleur avec le milieu
- stockage possible mais limité

- pompage – réinjection
- grand stockage de chaleur possible
- à optimiser

- pompage et réinjection éventuelle
- T sous-sol constante
- pas vraiment de stockage



Merci !

Références *(parmi d'autres)*

- Abesser, C., and Walker, A. 2022. Geothermal Energy. POST Brief 46. Available at: <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/POST-PB-0046/POST-PB-0046.pdf>
- Bailey, M.T., Gandy, C.J., Watson, I.A., Wyatt, L.M. and A.P. Jarvis. 2016. Heat recovery potential of mine water treatment systems in Great Britain, *International Journal of Coal Geology* 164: 77-84.
- Bulté M., Duren T., Bouhon O., Petitclerc E., Agniel M. and A. Dassargues. 2021. Numerical modeling of the interference of thermally unbalanced Aquifer Thermal Energy Storage systems in Brussels (Belgium). *Energies* 14, 6241.
- Dassargues A., 2018. *Hydrogeology: groundwater science and engineering*, 472p. Taylor & Francis CRC press, Boca Raton.
- Dassargues A. 2020. *Hydrogéologie appliquée : science et ingénierie des eaux souterraines*, 512p. Dunod. Paris.
- De Paoli, C., Duren, Th., Petitclerc, E., Agniel, M., and Dassargues, A. 2023. Modelling interactions between three Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems in Brussels (Belgium). Special Issue on Advances in Underground Energy Storage for Renewable Energy Sources, Volume II. *Applied Sciences* 13, 2934
- 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.
- 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.
- 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.
- Fraser-Harris, A., McDermott, C., Receveur, M., Mouli-Castillo, J., Todd, F., Cartwright-Taylor, A., Gunning, A. and M. Parsons, 2022, The Geobattery Concept: A Geothermal Circular Heat Network for the Sustainable Development of Near Surface Low Enthalpy Geothermal Energy to Decarbonise Heating. *Earth Sciences, Systems and Society* 2:10047
- Gluyas, J. G., Adams, C. A., and Wilson, I. A. G. 2020. The Theoretical Potential for Large-Scale Underground Thermal Energy Storage (UTES) within the UK. *Energy Rep.* 6, 229–237.
- Gossler, M. A., Bayer, P., Rau, G. C., Einsiedl, F., & Zosseder, K. 2020. On the limitations and implications of modeling heat transport in porous aquifers by assuming local thermal equilibrium. *Water Resources Research*, 56, e2020WR027772.
- 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.
- 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.
- Hoffmann R., Goderniaux P., Jamin P., Chatton E., de la Bernardie J., Labasque T., Le Borgne T. and A. Dassargues, 2020. Continuous dissolved gas tracing of fracture-matrix exchanges. *Geophysical Research Letters* 47(17): e2020GL088944

Références *(parmi d'autres, suite)*

- Hoffmann R., Maréchal J.C., Selles A. and A. Dassargues. 2022. Heat tracing in a fractured aquifer with injection of hot and cold water. *Groundwater* 60(2): 192-209.
- 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.
- Possemiers Mathias – Aquifer Thermal Energy Storage under different hydrochemical and hydrogeological conditions, PhD thesis, KULeuven, 2014.
- 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.
- 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.