



CBH 2019

Géothermie peu profonde

A. Dassargues

Introduction à la géothermie et principes théoriques sur le transfert et le stockage de chaleur dans le sous-sol

Référence: Chapter 11: Dassargues A., 2018. Hydrogeology: groundwater science and engineering, 472p. Taylor & Francis CRC press

Introduction à la géothermie et principes théoriques sur le transfert et le stockage de chaleur dans le sous-sol



- ▶ *Introduction à la géothermie*
- ▶ *Introduction à la géothermie peu profonde*
- ▶ *Efficacité / Impact*
- ▶ *Transferts et stockage de chaleur dans le sous-sol*
 - *Remarques préliminaires*
 - *Conduction thermique*
 - *Advection/convection*
 - *Dispersion thermique*
 - *Equation du transfert de chaleur en milieu souterrain*
 - *Simplification*
 - *Comparaison avec équation du transport de soluté*
 - *Exemple de simulation*
- ▶ *Nombres adimensionnels utiles*
 - *Nombre de Peclet*
 - *Nombre de Rayleigh*
 - *Nombre de Lewis*
- ▶ *Systèmes géothermiques dans d'anciennes mines*
 - *Faisabilité*
 - *Défis*
- ▶ *Références bibliographiques*

Introduction à la géothermie



- *importance croissante des transferts de chaleur dans les milieux géologiques*
- *en particulier dans les aquifères*
- *nouvelles demandes de sources d'énergie renouvelables*
- *depuis longtemps: température = traceur pour des études hydrologiques ou hydrogéologiques*
- *interactions eaux souterraines - eaux de surface*
- *quantifier débits à travers des fractures individuelles*
- *détecter chenaux préférentiels dans des aquifères*
- *évolution rapide avec les nouvelles techniques de mesure disponibles DTS*
- *importance des énergies renouvelables dans le nouveau 'nexus' eau-énergie-alimentation*

Introduction à la géothermie



- *systemes géothermiques ... , ne requérant aucune anomalie du gradient géothermique local*
- *deux types de géothermie peu profonde:*
 1. *circuits fermés (Borehole Thermal Energy Storage - BTES)*
 2. *circuits ouverts (Aquifer Thermal Energy Storage - ATES)*

➡ *pompage et réinjection dans aquifère peu profond*

➡ *conditions hydrogéologiques spécifiques*

➡ $\left\{ \begin{array}{l} \text{conductivité hydraulique } \gg \\ \text{gradient } \ll \end{array} \right.$

(Dassargues 2018, Stauffer et al. 2014)

+ aspects administratifs et légaux relatifs aux permis

Introduction à la géothermie



En Suisse:

<http://geothermie-schweiz.ch/?lang=fr>

Earth Energy Society of Canada

<http://www.earthenergy.ca/conta.html>

European Geothermal Energy Council EGEC

<http://www.egec.org/>

European organizations:

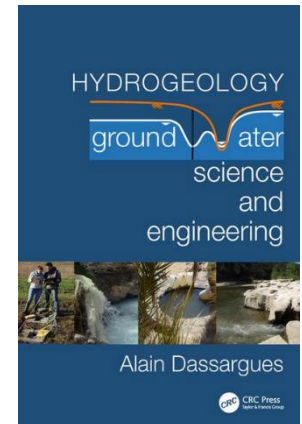
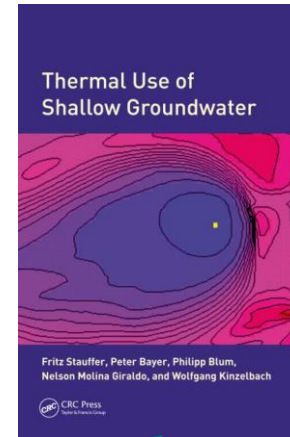
www.geotrained.eu

BRGM

<http://www.geothermie-perspectives.fr/>

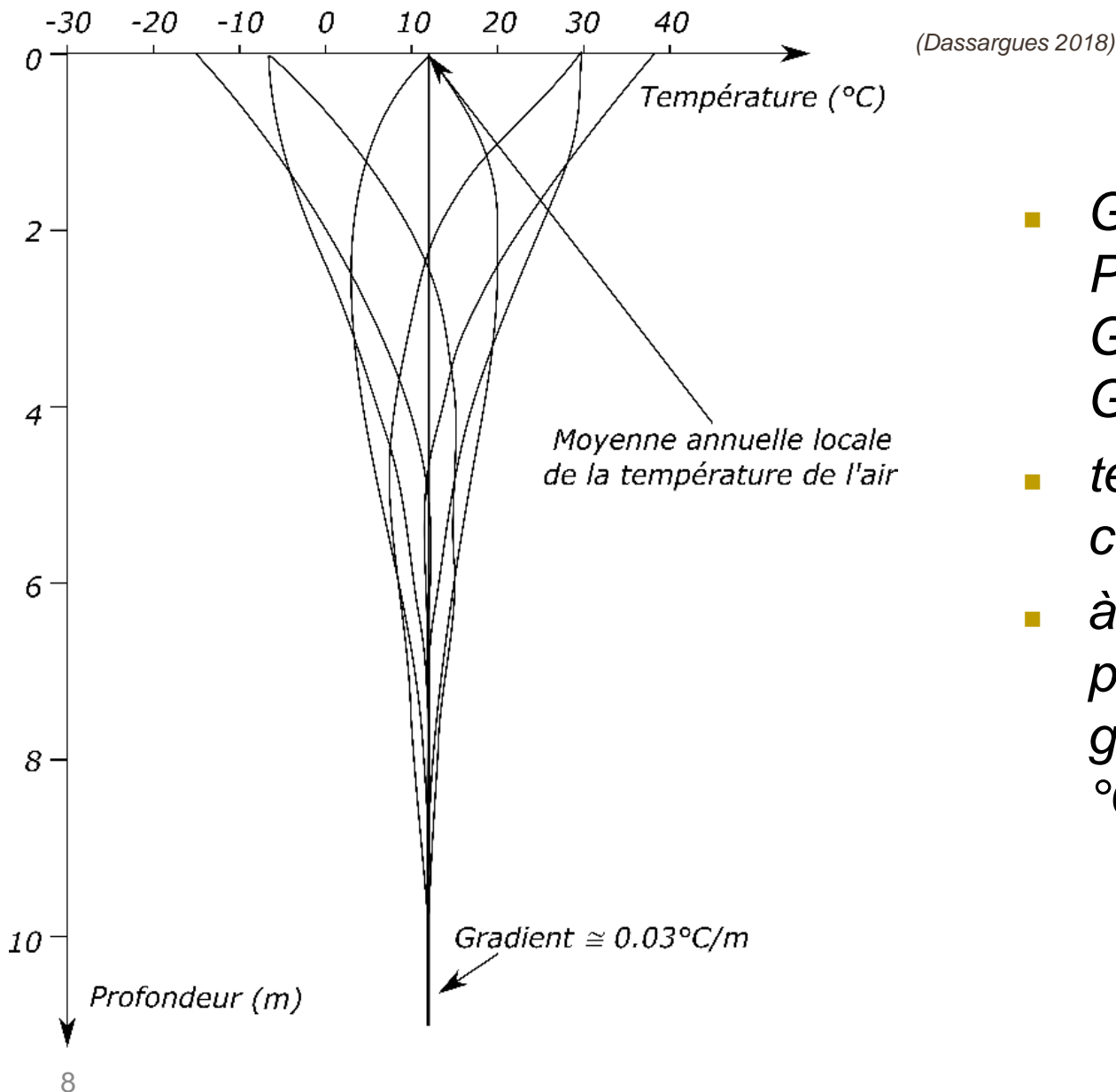
Wallonie

<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18273>



- ❑ - F. Stauffer, P. Bayer, Ph. Blum, N. Molina Giraldo, W. Kinzelbach. 2014. *Thermal Use of Shallow Groundwater*, CRC Press.
- ❑ Clauser Ch. 2003, *Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers*, Springer.
- ❑ Dassargues, 2018, Chap 11: *Heat transfer in aquifers and shallow geothermy*, in: *Hydrogeology: groundwater science and engineering*, CRC Press, Taylor & Francis

Introduction à la géothermie peu profonde

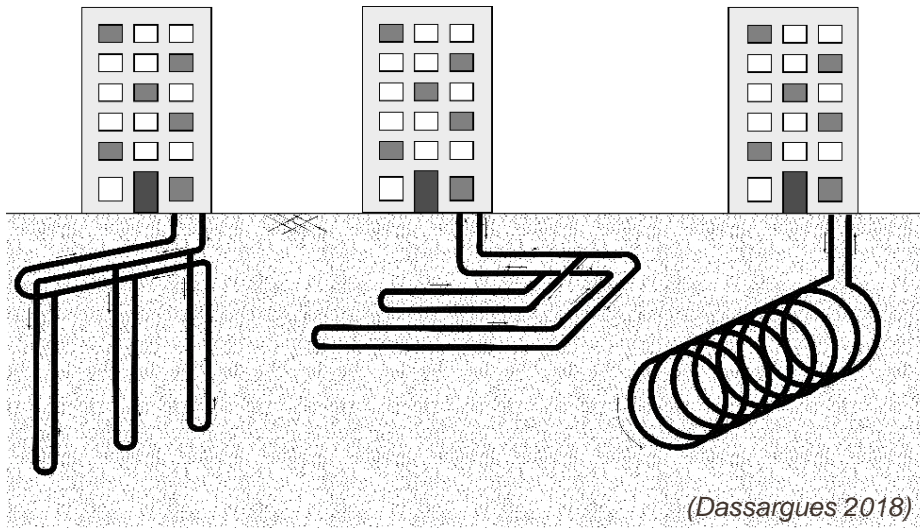


- Ground Source Heat Pump - GSHP ou Ground Heat Pump - GHP
- température presque constante $12,5^{\circ}\text{C}$
- à plus grande profondeur, gradient géothermique $0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Introduction à la géothermie peu profonde

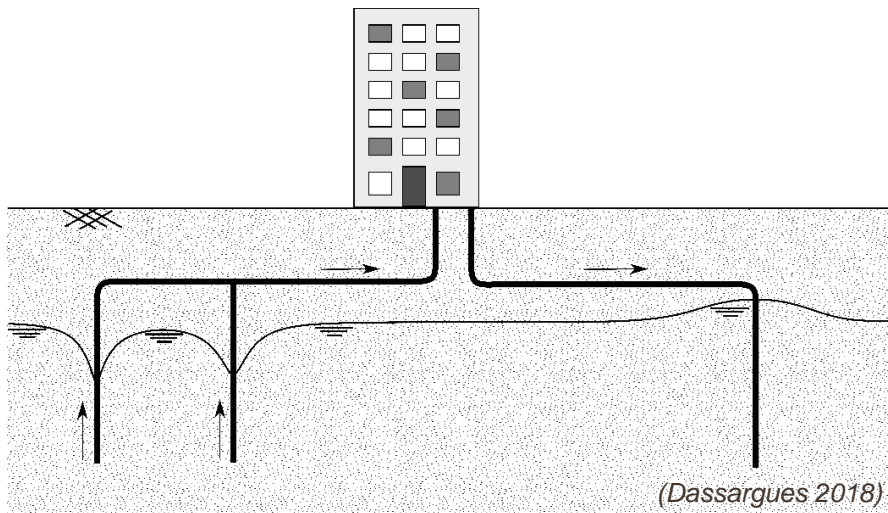


Underground Thermal
Energy Storage - UTES



■ BTES

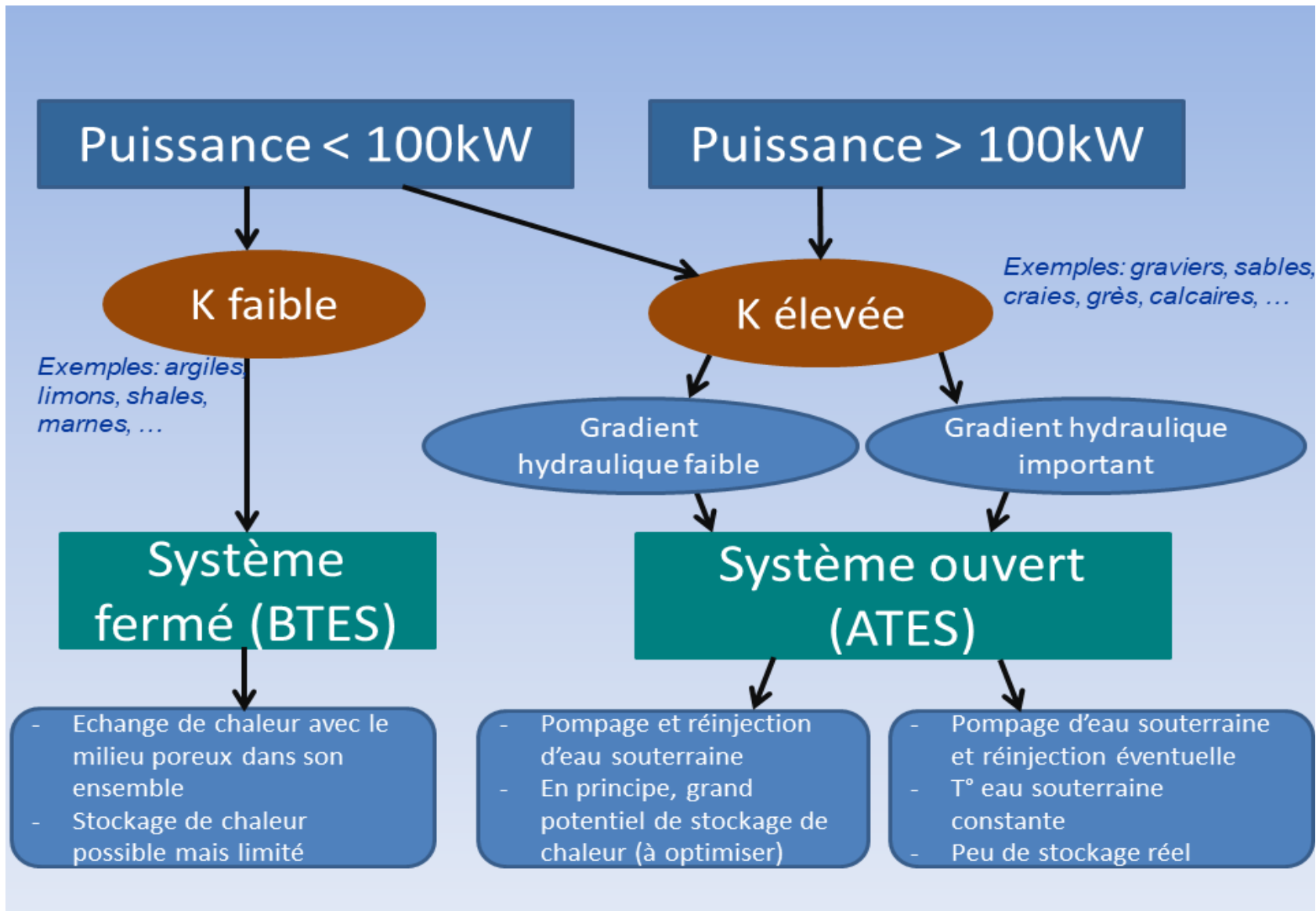
- Puissance (W ou J/s)
- Energie = Puissance x temps (kWh)
- COP = Puissance délivrée / Puissance électrique



■ ATES $\frac{\text{Puissance géothermique}}{\text{Puissance électrique}}$

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

Introduction à la géothermie peu profonde



Introduction à la géothermie peu profonde



Deux aspects à étudier sérieusement:

- ✓ *rendement/efficacité à court, moyen et long terme*
- ✓ *impacts environnementaux*

+ liés aux aspects administratifs et légaux relatifs aux permis

Rendement/efficacité

- *limitations K pour ATES*
- *limitations longueur d'échange pour BTES*
- *températures réelles à court, moyen, long terme*
- *réactions biochimiques redox: colmatage*

Impacts

- *effet sur quantité et qualité ESO*
- *rabattements locaux (ATES)*
- *effets sur écosystèmes dépendants*

Avantage à équilibrer thermiquement les échanges: sur quelles périodes ?

Transferts et stockage de chaleur dans le sous-sol



Remarques préliminaires

- *physiquement: différences par rapport au transport de solutés*
- *la chaleur transportée à la fois via les pores/fissures et via la matrice solide du milieu*
- *pour construire l'équation de conservation de la chaleur dans un milieu souterrain:*
 - *conduction thermique*
 - *convection/advection*
 - *dispersion thermique*
 - *exprimer conservation/bilan sur un volume donné*
 - *directement en conditions transitoires*
 - *EVR, en milieu souterrain assimilé à un milieu poreux*

Transferts et stockage de chaleur

dans le sous-sol



Conduction thermique

- *conduction des zones de température élevée vers zones de basse température*
- *existe sans aucun écoulement de fluide*
- *le 'driver' = le gradient thermique*
- *loi linéaire de Fourier: flux de conduction thermique*

W/m² ou J/(s.m²) :

$$\mathbf{f}_{tcond} = -\lambda_b \mathbf{grad} T = -\lambda_b \nabla T$$

- *λ_b conductivité thermique W/(m°K) du milieu poreux global (i.e. roche plus fluide : 'bulk porous medium')*
- *∇T le gradient de température (°K/m)*

Transferts et stockage de chaleur dans le sous-sol



Conduction thermique

- *conductivité thermique globale du milieu: scalaire*
- *moyenne géométrique pondérée des conductivités thermiques du solide et de l'eau :*

$$\lambda_b = \lambda_s^{(1-\theta)} \lambda_w^\theta$$

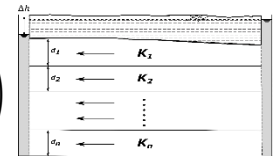
(Dassargues 2018, Nield et Bejan 2013)

mais aussi:

- *si conduction thermique propagée en //*

$$\lambda_b = (1 - \theta)\lambda_s + \theta\lambda_w$$

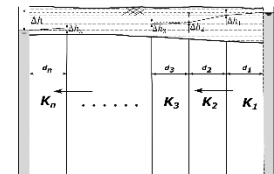
$$K_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n K_i d_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)$$



- *si conduction thermique propagée en série*

$$1/\lambda_b = (1 - \theta)/\lambda_s + \theta/\lambda_w$$

$$K_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n d_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \right)$$



Transferts et stockage de chaleur

dans le sous-sol



Conductivité thermique

Lithologie*	λ_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

(adapté de Clauser and Huenges 1995, Eppelbaum et al. 2014, Stauffer et al. 2014)

* valeurs pour conditions sèches (air dans les pores et les fissures).

Les valeurs en conditions saturées ou partiellement saturées seront légèrement plus élevées en fonction de la teneur en eau et résultant de la différence de conductivité thermique de l'eau et de l'air.

Les données obtenues à partir de roches locales devraient être privilégiées pour les calculs détaillés des systèmes géothermiques.

Valeurs entre 0.2 et 5 $W/(m^{\circ}K)$: intervalle de variation $\lll K$

Transferts et stockage de chaleur

dans le sous-sol



Advection/convection thermique

- *transport de chaleur avec le mouvement du fluide (l'eau)*

- *advection thermique*

$$\mathbf{f}_{tconv} = \rho_w c_w \mathbf{q} T$$

- *attention aux termes utilisés (2 écoles):*

- *les flux de chaleur associés à tous les mouvements de l'eau souterraine (Δh et différences de densité induites par ΔT) sous le terme advection ou convection*

- *'convection forcée' et 'convection naturelle ou libre'*

- *ρ_w densité en kg/m^3 , c_w capacité thermique de l'eau en $\text{J}/(\text{kg}^\circ\text{K})$*

- *Attention : $\rho_w c_w =$ capacité thermique volumique de l'eau en $\text{J}/(\text{m}^3^\circ\text{K})$*

- *$q =$ vecteur de flux total d'eau (m/s) (loi de Darcy + effet possible de la température sur la densité et la viscosité de l'eau)*

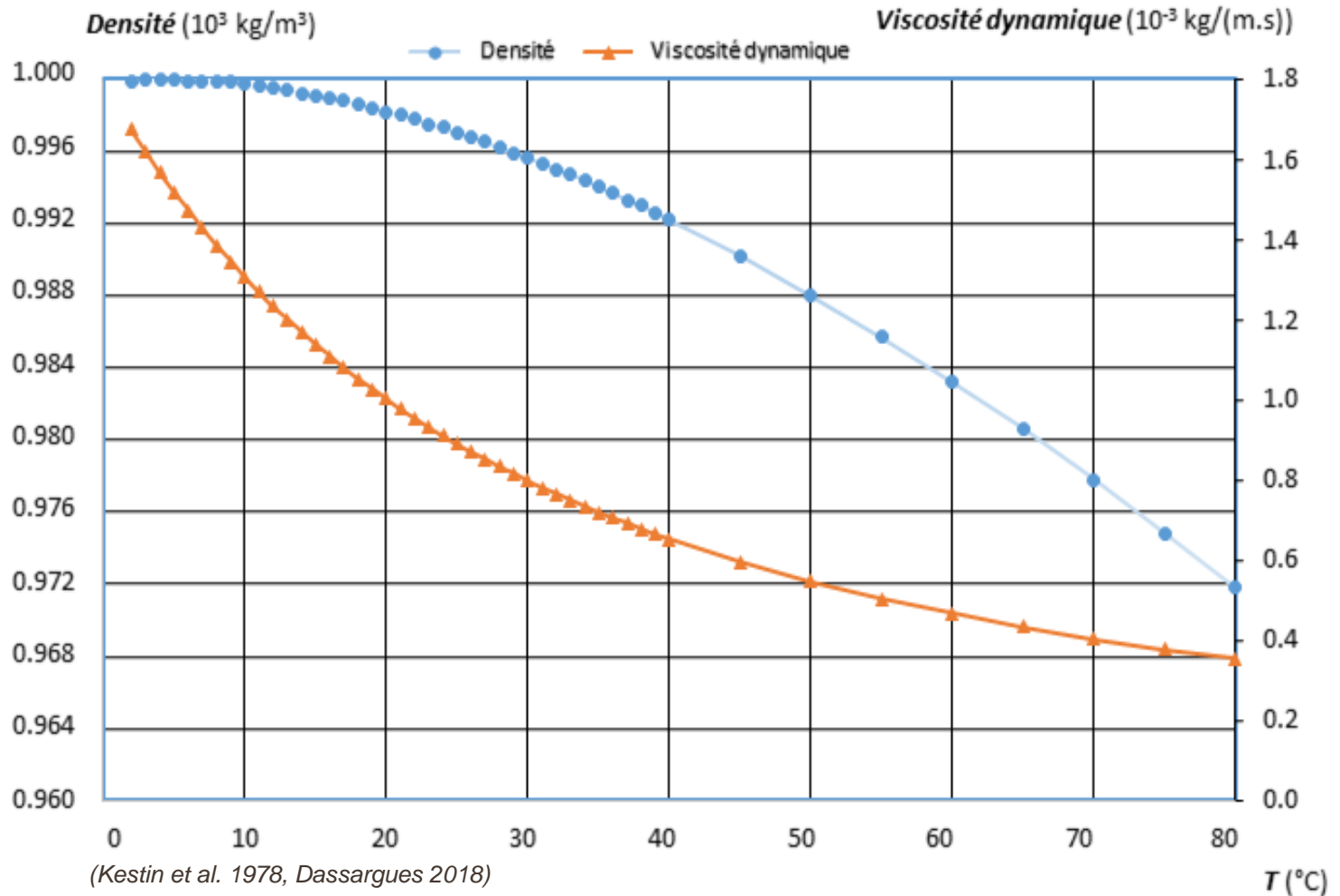
Transferts et stockage de chaleur



dans le sous-sol

Advection/convection thermique

- effet possible de la température sur la densité et la viscosité de l'eau



Transferts et stockage de chaleur



dans le sous-sol

Advection/convection thermique

- effet possible de la température sur la densité et la viscosité de l'eau

T°	ρ	μ	K
[°C]	[kg/m ³]	[kg/m.s]	[m/s]
0	999.843	1.787 10 ⁻³	5.4 10 ⁻⁶
10	999.703	1.307 10 ⁻³	7.4 10 ⁻⁶
20	998.207	1.002 10 ⁻³	9.6 10 ⁻⁶
30	995.650	0.798 10 ⁻³	12.2 10 ⁻⁶
40	992.219	0.653 10 ⁻³	14.7 10 ⁻⁶

Transferts et stockage de chaleur



dans le sous-sol

Advection/convection thermique

- *nombre adimensionnel M de 'convection mixte' pour quantifier: convection libre / convection forcée*

$$M(T) = [\rho_{max} - \rho(T)] / \left[\rho(T) \frac{\partial h}{\partial z} \right]$$

- *pratique car sa valeur n'est fonction que de la densité maximale prévue de l'eau souterraine et du gradient piézométrique*

Transferts et stockage de chaleur

dans le sous-sol



Dispersion thermique

- *concept similaire à dispersion gaussienne d'un soluté*
- *propagation de la chaleur non seulement à travers les pores et/ou les fissures, mais également à travers les hétérogénéités de la matrice solide au sein de l'EVR*
- *dispersion thermique \ll dispersion mécanique d'un soluté*

$$f_{tdisp} = -\rho_b c_b \mathbf{D} \cdot \nabla T$$

(Bear 1972, Hopmans et al. 2002, Anderson 2005, Dassargues 2018)

W/m² ou J/(s.m²)

*Attention: capacité thermique globale volumique du milieu: $\rho_b c_b$
J/(m³°K):*

$$\rho_b = (1 - \theta)\rho_s + \theta\rho_w$$

$$c_b = (1 - \theta)c_s + \theta c_w$$

Transferts et stockage de chaleur dans le sous-sol



Dispersion thermique

- en fait, très limitée et proportionnelle à $(v_e)^2$

(Rau et al. 2012, Anderson 2005, Dassargues 2018)

Lithologie*	c_b ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	$\rho_b c_b$ ($Jm^{-3}K^{-1}$)
granites et gneiss	0,74 – 0,79 x10 ³	2,0 – 2,1 x10 ⁶
basaltes	0,79 – 0,86 x10 ³	2,1 – 2,3 x10 ⁶
quartzites	0,70 – 0,75 x10 ³	1,85 – 1,95 x10 ⁶
shales	0,89 – 1,11 x10 ³	2,5 – 3,0 x10 ⁶
micaschistes et ardoises	0,71 – 1,11 x10 ³	2,0 – 3,0 x10 ⁶
calcaires et dolomies	0,80 – 0,91 x10 ³	2,2 – 2,5 x10 ⁶
craies	0,90 x10 ³	2,2 – 2,25 x10 ⁶
grès	0,74 – 0,92 x10 ³	1,63 – 2,2 x10 ⁶
siltites	0,79 – 0,88 x10 ³	2,0 – 2,2 x10 ⁶
tuffs volcaniques	0,2 x10 ³	0,2 – 0,5 x10 ⁶
graviers	1,0 – 1,5 x10 ³	1,3 – 2,0 x10 ⁶
sables	0,8 – 0,96 x10 ³	1,5 – 2,1 x10 ⁶
silts	0,8 – 1,1 x10 ³	1,7 – 2,3 x10 ⁶
limons, loess et argiles	1,1 – 2,1 x10 ³	2,3 – 4,2 x10 ⁶
air	1,005 x10 ³	1,25
eau	4,18 x10 ³	4,18 x10 ⁶
matière organique	1,93 x10 ³	2,51 x10 ⁶

* valeurs pour conditions sèches (air dans les pores et les fissures).

Les valeurs en conditions saturées ou partiellement saturées seront plus élevées en fonction de la teneur en eau et résultant de la différence importante de conductivité thermique de l'eau et de l'air.

Les données obtenues à partir de roches locales devraient être privilégiées pour les calculs détaillés des systèmes géothermiques.

Transferts et stockage de chaleur

dans le sous-sol



Equation de conservation de la chaleur

exprime l'équation de bilan ou de conservation de la chaleur (approche similaire à l'équation de transport de soluté)

$$\frac{\partial \rho_b c_b T}{\partial t} = -\nabla \cdot [\rho_w c_w \mathbf{q} T - (\lambda_b + c_b \rho_b \mathbf{D}) \cdot \nabla T] + Q_T$$

termes en W/m³

(Therrien et al. 2010, Klepikova et al. 2016, Dassargues 2018)

Simplification

- *dispersion thermique négligée par rapport à conduction*

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

(Hopmans et al. 2002, Constantz et al. 2003, Vandenbohede et al. 2009, Ma et Zheng 2010, Irvine et al. 2015)

Transferts et stockage de chaleur



dans le sous-sol

Equation de conservation de la chaleur simplifiée et divisée par $\rho_b c_b$

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

(Anderson 2005, Dassargues 2018)

termes en °K/s

$\lambda_b / (\rho_b c_b) =$ diffusivité thermique de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-6} m²/s

$Q_T / (\rho_b c_b) =$ température associée au flux unitaire d'eau entrant ou sortant du domaine

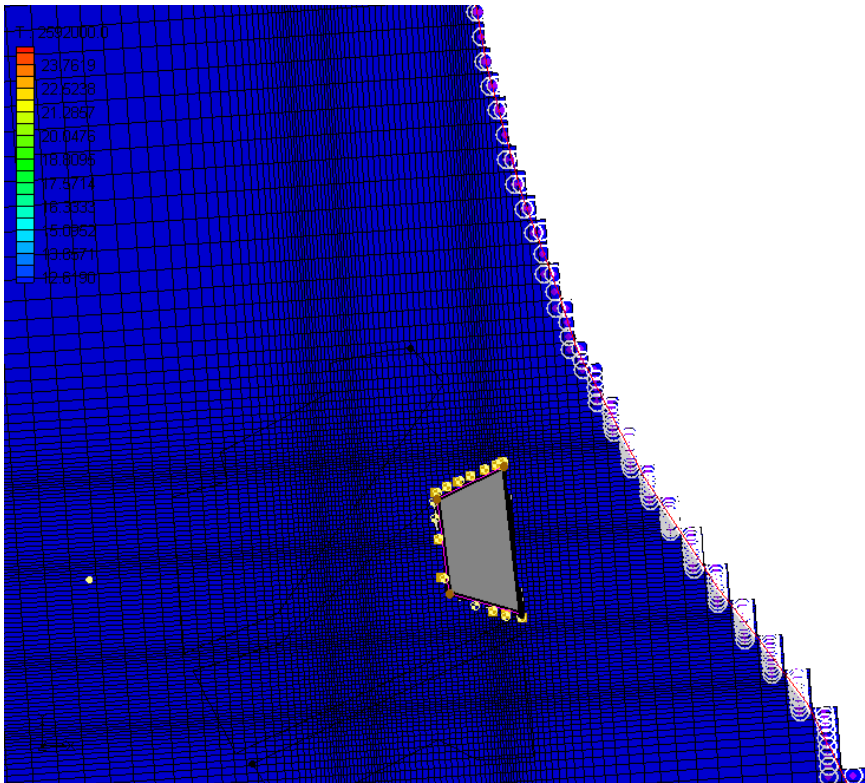
diffusivité thermique \gg diffusion moléculaire

(3 à 4 ordres supérieure)

Pour comparaison avec équation de transport de soluté:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\frac{q}{n_e} C - \mathbf{D}_h \nabla C \right] - \Gamma C R \pm C \frac{Q'}{n_e}$$

Exemple de simulation système ouvert plaine alluviale de la Meuse à Liège



- **worst case scenario = refroidissement**
- **grande puissance demandée correspondant à 200 m³/h**
- **OK si $K= 10^{-3}$ m/s et pompages intermittents**
- **frontière chaude = la Meuse à 27°C**
- **essais de pompages: cruciaux pour le projet**
- **rabattements ?**
- **réinjections ?**

Nombres adimensionnels utiles



- *dans milieux peu perméables: conduction thermique peut masquer chenaux préférentiels d'eau souterraine et de flux thermiques*
- *dans les aquifères, variation des valeurs des paramètres thermiques sont inférieures de quelques ordres de grandeur aux variations des conductivités hydrauliques*
- *advection/convection dans fractures combiné conduction thermique dans matrice rocheuse*

(Irvine et al. 2015, Fox et al. 2016, Ma et al. 2012, Dassargues 2018)

$$Pe = c_w q l / \lambda_b$$

= nombre de **Peclet thermique** utilisé pour analyser le rapport advection / conduction thermique

(ou conduction thermique + dispersion thermique si cette dernière n'est pas négligée)

... mais problème de définition du l

Nombres adimensionnels utiles



Dans une colonne d'eau (forage ou puits), *nombre adimensionnel de Rayleigh*

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

- β = coefficient d'expansion thermique volumique ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)
- Δh = hauteur de la colonne d'eau dans le puits (m)
- ΔT = différence de température entre la base et le sommet du puits ($^{\circ}\text{K}$)
- ν = viscosité cinématique (m^2/s)
- κ diffusivité thermique (m^2/s).

(Love et al. 2007, Rau et al. 2012, Dassargues 2018)

rapport entre convection naturelle et conduction thermique

valeur critique de Ra pour l'apparition de convection naturelle dans forage/puits vertical

Nombres adimensionnels utiles



- *apparition de convection naturelle dans forage/puits vertical dépend principalement du rapport entre le rayon du puits et la hauteur de la colonne d'eau: $\delta = r / \Delta h$*

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

(Love et al 2007, Hamm et Bazargan Sabet 2010, Simmons et al. 2001, Graf et Simmons, 2009, Dassargues 2018)

- *recommandé de pomper les eaux souterraines par des puits de faibles diamètres ou des forages*
- *en plus : variation de densité par composition eaux souterraines*

Nombres adimensionnels utiles



Comparaison transports de soluté et de chaleur

- *nombre adimensionnel de Lewis*

= rapport entre diffusivité thermique et dispersion de soluté:

$$Le = \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b D} = \frac{\kappa}{D}$$

(Simmons et al. 2001, Graf et Simmons, 2009, Dassargues 2018)

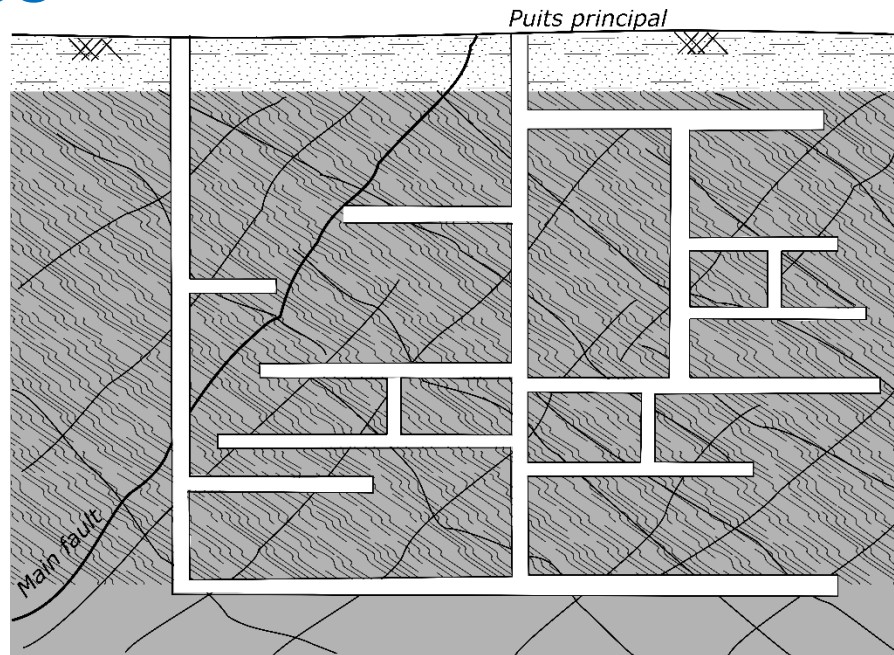
Systemes géothermiques dans d'anciennes mines



- *souvent: inondation des anciens travaux souterrains*
- *géométrie réelle du réseau interconnecté de galeries, de cavités et de puits ouverts est extrêmement complexe*
- *écoulement à grande vitesse dans ce réseau*
- *écoulement d'eau souterraine 'normal' dans massif rocheux fracturé/poreux*
- *principe:*
 - *eau chaude pompée dans parties profondes du réseau ouvert (galerie profonde)*
 - *eau froide réinjectée dans anciens travaux superficiels*
 - *essentiel de calculer l'évolution de la température dans les zones de pompage en tenant compte du mélange avec les eaux plus froides*

(Hamm et Bazargan Sabet, 2010, Dassargues 2018)

Systemes géothermiques dans d'anciennes mines



à étudier:

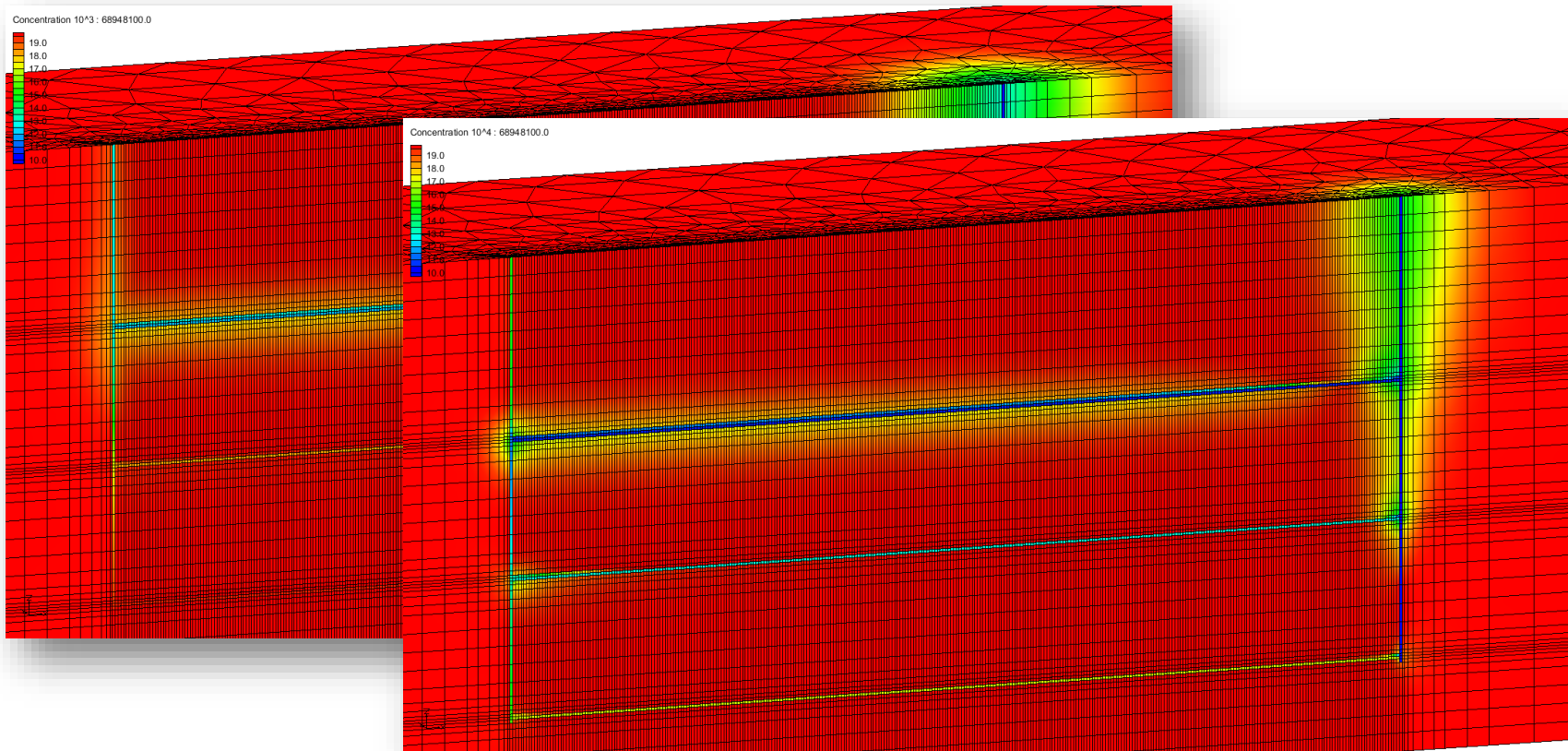
- rendements
- impacts et risques

- *advection dans réseau et dans massif*
- *+ gradient géothermique: convection naturelle dans les puits*
- *+ conduction dans le massif*

Défis:

- *acquisition de données*
- *simulations (réseau + massif fracturé)*

Systemes géothermiques dans d'anciennes mines



(Vopat, 2018)

Défis:

- acquisition de données
- simulations (réseau + massif fracturé)

à étudier:

- rendements
- impacts et risques

References



- ▶ Anderson, M.P. 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43(6) : 951-968.
- ▶ Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. New-York: American Elsevier Publishing Company Inc.
- ▶ Anibas, Ch., Kukral, J., Possemiers, M. and M. Huysmans. 2016. Assessment of seasonal Aquifer Thermal Energy Storage as a groundwater ecosystem service for the Brussels-Capital Region: Combining groundwater flow, and heat and reactive transport modelling. *Energy Procedia* 97: 179-185.
- ▶ Arola, T. and K. Korkka-Niemi. 2014. The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeology Journal* 22 : 1953–1967.
- ▶ Bense, V. F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Chalari, A., Mondanos, M., Ciocca, F. and J. S. Selker. 2016. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology, *Water Resources Research* 52: 9259–9273.
- ▶ Beyer, Ch., Popp, S. and S. Bauer. 2016. Simulation of temperature effects on groundwater flow, contaminant dissolution, transport and biodegradation due to shallow geothermal use. *Environmental Earth Sciences* 75: 1244.
- ▶ Bonte, M., van Breukelen, B.M. and P.J. Stuyfzand. 2013. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research* 47: 5088–5100.
- ▶ Clauser, C. and E. Huenges. 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals. In *Rock physics & phase relations: A handbook of physical constants*, ed. T. J. Ahrens, 105-126. Washington, D. C. : AGU.
- ▶ Constantz, J., Cox, M.H. and G.W. Su. 2003. Comparison of heat and bromide as ground water tracers near streams. *Ground Water* 41(5): 647-656.
- ▶ Dassargues, A. 2018. *Hydrogeology: groundwater science and engineering*, CRC Press, Taylor & Francis.
- ▶ Dehkordi, S.E., Schincariol, R.A. and B. Olofsson. 2015. Impact of groundwater flow and energy load on multiple borehole heat exchangers. *Groundwater* 53(4): 558-571.
- ▶ De Keuleneer, F. and Ph. Renard. 2015. Can shallow open-loop hydrothermal well-doublets help remediate seawater intrusion?. *Hydrogeology Journal* 23(4) : 619-629.
- ▶ 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.
- ▶ Florides, G. and S. Kalogirou, S. 2008. First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus. *Applied Thermal Engineering* 28 : 157-163.

References (2)



- ▶ 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.
- ▶ García-Gil, A., Epting, J., Ayora, C., Garrido, E., Vázquez-Suñé, E., Huggenberger, P. and A.C. Gimenez. 2016. A reactive transport model for the quantification of risks induced by groundwater heat pump systems in urban aquifers. *Journal of Hydrology* 542: 719–730.
- ▶ Gehlin, S. 2002. Thermal Response Test - method, development and evaluation. PhD thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- ▶ 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.
- ▶ Griebler, C., Brielmann, H., Haberer, Ch.M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, Ch., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S. and T. Lueders. 2016. Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences* 75: 1391.
- ▶ 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.
- ▶ Hausner, M.B., Suárez, F., Glander, K.E., van de Giesen, N., Selker, J.S. and S.W. Tyler. 2011. Calibrating single-ended fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors* 11(11) : 10859-10879.
- ▶ 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.
- ▶ Hopmans, J.W., Simunek, J. and K.L. Bristow. 2002. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry and dispersion effects. *Water Resources Research* 38(1) : 7-1–7-13.
- ▶ 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.
- ▶ Irvine, D. J., Simmons, C. T., Werner, A. D. and T. Graf. 2015. Heat and solute tracers: how do they compare in heterogeneous aquifers? *Groundwater* 53(S1) : 10-20.
- ▶ Irvine, D.J., Briggs, M.A., Lautz, L.K., Gordon, R.P., McKenzie, J.M. and I. Cartwright. 2017a Using diurnal temperature signals to infer vertical groundwater-surface water exchange. *Groundwater*, 55 : 10–26.
- ▶ Irvine, D.J., Kurylyk, B.L., Cartwright, I., Bonham, M., Post, V.E.A., Banks, E.W. and C.T. Simmons. 2017b. Groundwater flow estimation using temperature-depth profiles in a complex environment and a changing climate. *Science of the Total Environment* 574 : 272-281.

References (3)



- ▶ 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.
- ▶ Kestin, J., Sokolov, M. and W.A. Wakeham. 1978. Viscosity of liquid water in the range -8°C to 150°C. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 7(3) : 941-948.
- ▶ 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.
- ▶ Kurylyk, B. L. and D. J. Irvine. 2016. Analytical solution and computer program (FAST) to estimate fluid fluxes from subsurface temperature profiles, *Water Resources Research* 52 : 725 – 733.
- ▶ Love, A. J., Simmons, C.T. and D. A. Nield. 2007. Double-diffusive convection in groundwater wells, *Water Resources Research* 43(8) : W08428.
- ▶ Lüders, K., Firmbach, L., Ebert, M., Dahmke, A., Dietrich, P. and R. Köber. 2016. Gas-phase formation during thermal energy storage in near-surface aquifers: experimental and modelling results. *Environmental Earth Sciences* 75: 1404.
- ▶ Ma, R. and Ch. Zheng. 2010. Effects of density and viscosity in modeling heat as a groundwater tracer. *Ground Water* 48(3) : 380–389.
- ▶ Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. and P. Blum. 2013. Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment* 442 : 123-133.
- ▶ Miotlinski, K. and P.J. Dillon. 2015. Relative recovery of thermal energy and fresh water in aquifer storage and recovery systems. *Groundwater* 53(6) : 877-884.
- ▶ Moradi, A., Smits, K.M., Lu, N. and J.S. McCartney. 2016. Heat transfer in unsaturated soil with application to borehole thermal energy storage. *Vadoze Zone Journal* 15(10): doi:10.2136/vzj2016.03.0027
- ▶ Nield, D.A. and A. Bejan. 2013. *Convection in porous media*. Springer
- ▶ Pollack, H.N., Hurter, S.J. and J.R. Johnson. 1993. Heat flow from the earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics* 31: 267-280.
- ▶ Possemiers, M., Huysmans, M., Anibas, Ch., Batelaan, O. and J. Van Steenwinkel. 2016. Reactive transport modeling of redox processes to assess Fe(OH)₃ precipitation around aquifer thermal energy storage wells in phreatic aquifers. *Environmental Earth Sciences* 75: 648
- ▶ Possemiers, M., Huysmans, M. and O. Batelaan. 2014. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 2: 20-34.
- ▶ Radioti, G. 2016. Shallow geothermal energy: effect of in-situ conditions on borehole heat exchanger design and performance. PhD Thesis University of Liège, Belgium.

References (4)



- ▶ Rau, G. C., Andersen, M.S., McCallum, A.M. and R. I. Acworth. 2010. Analytical methods that use natural heat as a tracer to quantify surface water-groundwater exchange, evaluated using field temperature records. *Hydrogeology Journal* 18(5): 1093–1110.
- ▶ Rau, G. C., Andersen, M.S. and R. I. Acworth. 2012. Experimental investigation of the thermal dispersivity term and its significance in the heat transport equation for flow in sediments, *Water Resources Research* 48 : W03511.
- ▶ Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. and R. Lefebvre. 2011. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy* 36(1) : 315-324.
- ▶ Schwede, R.L., Li, W., Leven, C. and O.A. Cirpka. 2014. Three-dimensional geostatistical inversion of synthetic tomographic pumping and heat-tracer tests in a nested-cell setup. *Advances in Water Resources* 63(0): 77–90.
- ▶ Seibertz, K.S.O., Chirila, M.A., Bumberger, J., Dietrich, P. and T. Vienken. 2016. Development of in-aquifer heat testing for high resolution subsurface thermal-storage capability characterisation. *Journal of Hydrology* 534 : 113-123.
- ▶ Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M. and M.B. Parlange, M. 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, 42: W12202.
- ▶ Sellwood, S., Hart D.J. and J.M. Bahr. 2015. Evaluating the use of in-well heat tracer tests to measure borehole flow rates. *Groundwater Monitoring & Remediation* 35(4) : 85-94.
- ▶ Shanafield, M. McCallum, J., Cook, P.G. and S. Noorduijn. 2017. Using basic metrics to analyze high-resolution temperature data in the subsurface, *Hydrogeology Journal* 25(5) : 1501-1508.
- ▶ Simmons, C.T., Fenstemaker, T.R. and J.M Sharp. 2001. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52 : 245-275.
- ▶ Spitler, J.D. and S. Gehlin, S. 2015. Thermal response testing for ground source heat pump systems - an historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 : 1125-1137.
- ▶ 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.
- ▶ Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A. and S.M. Panday. 2010. *Hydrogeosphere: A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport*. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo ON.
- ▶ van de Giesen, N., Steele-Dunne, S.C., Jansen, J., Hoes, O., Hausner, M.B., Tyler, S. and J.S. Selker. 2012. Double ended calibration of fiber optic Raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors* 12(5) : 5471-5485.

References (5)



- ▶ Vandenbohede, A., Louwyck, A. and L. Lebbe. 2009. Conservative solute versus heat transport in porous media during push-pull tests. *Transp. Porous Media* 76(2) :265–287.
- ▶ VDI 4640. 2001. Thermal use of the underground - GSHP systems (German guidelines for ground coupled heat pumps, UTES and direct thermal use of the underground). Part 2, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf :VDI-Verlag.
- ▶ Vienken, T., Schelenz, S., Rink, K. and P. Dietrich. 2015. Sustainable intensive thermal use of the shallow subsurface - A critical view on the status quo. *Groundwater* 53(3): 356-361.
- ▶ Vopat, O. 2017. Modélisation des caractéristiques hydrogéologiques liées à une exploitation géothermique d'anciennes mines, Master Ing. des Mines et Géologue, ULiège.
- ▶ Wagner, V., Li, T., Bayer, P., Leven, C., Dietrich, P. and Ph. Blum. 2014. Thermal tracer testing in a sedimentary aquifer: field experiment (Lauswiesen, Germany) and numerical simulation. *Hydrogeology Journal* 22 (1): 175–187.
- ▶ 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.
- ▶ Xie, Y., Cook, P.G., Simmons, C.T. and C. Zheng. 2015. On the limits of heat as a tracer to estimate reach-scale river-aquifer exchange flux. *Water Resources Research* 51(9): 7401-7416.