UE Géoressources – Licence 2

Exploiter la chaleur de la Terre

Corrigé – Gradient, doublets, réseaux de chaleur, géothermie profonde et pompes à chaleur

Point de vigilance

Les calculs de ce TD sont des modèles pédagogiques volontairement simples. Un projet réel nécessite des données de forage, des essais hydrauliques, une caractérisation du réservoir, des modèles thermiques et hydrodynamiques, l'évaluation des pertes de charge, des auxiliaires et des impacts environnementaux. Les gradients ne sont notamment pas constants à toutes les profondeurs.

1. QCM de mise en route

Éléments de correction

a) **Faux.** Le gradient géothermique est une variation de température par unité de profondeur. Il s'exprime par exemple en °C/100m ou en K/km.

b) **Vrai.** À gradient plus élevé, la température augmente plus rapidement avec la profondeur.

c) **Faux.** Il faut pouvoir transférer la chaleur vers un fluide et l'extraire à un débit suffisant. Température, perméabilité, porosité, fracturation et présence de fluide sont déterminantes.

d) **Vrai.** La réinjection contribue au maintien de la pression, limite les rejets de saumures et participe à la gestion du réservoir.

e) **Faux.** L'électricité alimente le compresseur, mais une grande partie de la chaleur livrée est prélevée dans le sol ou l'aquifère superficiel.

f) **Vrai.** À l'échelle locale, une extraction trop intense peut créer une déplétion thermique et un refroidissement progressif du fluide produit.

2. Gradient géothermique et profondeur d'exploitation

Éléments de correction

On écrit le gradient en °C/m :

$$g_A = 0.03\ ^\circ\text{C/m}, \qquad g_B = 0.10\ ^\circ\text{C/m}.$$

a) Températures à 2 et 4 km

Contexte A :

$$T(2000) = 15 + 0.03 \times 2000 = \boxed{75\,^\circ\text{C}},$$

$$T(4000) = 15 + 0.03 \times 4000 = \boxed{135\,^\circ\text{C}}.$$

Contexte B :

$$T(2000) = 15 + 0.10 \times 2000 = \boxed{215\,^\circ\text{C}},$$

$$T(4000) = 15 + 0.10 \times 4000 = \boxed{415\,^\circ\text{C}}.$$

Ces dernières valeurs illustrent surtout l'effet mathématique d'une extrapolation linéaire ; elles ne doivent pas être prises comme des prédictions géologiques réalistes à grande profondeur.

b) Profondeur pour 80 °C

$$z = \frac{T - T_0}{g}.$$

Contexte A :

$$z_A = \frac{80 - 15}{0.03} \simeq \boxed{2\,170\,\text{m}}.$$

Contexte B :

$$z_B = \frac{80 - 15}{0.10} = \boxed{650\,\text{m}}.$$

c) Profondeur pour 150 °C

Contexte A :

$$z_A = \frac{150 - 15}{0.03} = \boxed{4\,500\,\text{m}}.$$

Contexte B :

$$z_B = \frac{150 - 15}{0.10} = \boxed{1\,350\,\text{m}}.$$

d) Intérêt économique

Le forage représente une part majeure du coût et du risque d'un projet. Si une température utile est atteinte moins profondément, les forages sont généralement plus courts, moins coûteux et moins risqués.

e) Limites de l'extrapolation

La température ne suffit pas. Il faut notamment connaître :

— la perméabilité et la fracturation ;
— la présence, le débit et la chimie du fluide ;
— la géométrie du réservoir ;
— les variations réelles du gradient avec la profondeur ;
— les pertes de charge et la pression ;
— la proximité d'un usage de chaleur ou d'un réseau électrique.

3. Exploitation d'un aquifère profond

Éléments de correction

Données : $Q = 250\,\text{m}^3/\text{h}$, $T_p = 75\,^\circ\text{C}$, $T_r = 35\,^\circ\text{C}$.

a) Débit massique

$$Q = \frac{250}{3600} = 0.0694\ \text{m}^3\,\text{s}^{-1}.$$

$$\dot{m} = \rho Q = 1000 \times 0.0694 = \boxed{69{,}4\,\text{kg/s}}.$$

b) Puissance thermique

$$\Delta T = 75 - 35 = 40\,\text{K}.$$

$$P_{th} = \dot{m} c_p \Delta T = 69.4 \times 4180 \times 40 \simeq 1.16 \times 10^7\ \text{W}.$$

$$\boxed{P_{th} \simeq 11{,}6\,\text{MW}}.$$

c) Énergie annuelle

$$E = 11.6 \times 4500 \simeq \boxed{52{,}3\,\text{GWh/year}}.$$

d) Nombre de logements

$$N = \frac{52\,300}{8} \simeq \boxed{6500\ \text{logements}}.$$

Il s'agit d'un maximum théorique : un réseau réel comporte des pertes, des auxiliaires, des pointes de demande et des périodes d'arrêt.

e) Intérêt de la réinjection

— maintien partiel de la pression du réservoir ;
— limitation de l'épuisement hydraulique ;
— confinement des fluides géothermaux parfois très minéralisés ;
— limitation des rejets thermiques et chimiques en surface ;
— gestion du bilan de masse de l'aquifère.

La réinjection doit toutefois être conçue pour éviter un retour trop rapide de l'eau refroidie vers le puits de production.

4. Refroidissement du réservoir : estimation simple

Éléments de correction

a) Volume total et volume de pores

$$V = 3\ \text{km}^2 \times 100\ \text{m} = 3 \times 10^6 \times 100 = \boxed{3.0 \times 10^8\ \text{m}^3}.$$

Avec $n = 0.15$:

$$V_p = nV = 0.15 \times 3.0 \times 10^8 = \boxed{4.5 \times 10^7\ \text{m}^3}.$$

b) Temps correspondant à un volume de pores

$$t = \frac{V_p}{Q} = \frac{4.5 \times 10^7}{250} = 180\,000\ \text{h}.$$

$$t = \frac{180\,000}{8760} \simeq \boxed{20.5\ \text{ans}}.$$

c) Pourquoi ce n'est pas une durée de vie ?

L'écoulement réel n'est pas un déplacement uniforme de tout le volume d'eau. Il existe des chemins préférentiels, de la dispersion, des zones peu connectées, des échanges de chaleur avec la matrice rocheuse et une géométrie tridimensionnelle complexe. Une partie de l'eau peut donc arriver beaucoup plus tôt, tandis qu'une autre partie du réservoir est peu sollicitée.

d) Phénomène limitant

Il s'agit de la **percée thermique** : le front d'eau refroidie atteint le puits producteur et la température de production diminue.

e) Moyens d'action

— augmenter la distance entre production et injection ;
— choisir l'orientation des puits en fonction de l'écoulement naturel ;
— réduire ou optimiser le débit ;
— répartir la réinjection entre plusieurs puits ;
— mieux caractériser les fractures et hétérogénéités ;
— piloter l'exploitation à partir d'un modèle thermo-hydrodynamique.

5. Géothermie profonde de type Soultz-sous-Forêts

Éléments de correction

Le débit vaut 100 L/s=0,100 m^3/s, soit environ 100 kg/s.

a) Puissance thermique

$$\Delta T = 200 - 70 = 130\,\text{K}.$$

$$P_{th} = 100 \times 4180 \times 130 = 5.434 \times 10^7\ \text{W} = \boxed{54{,}3\,\text{MW}}.$$

b) Puissance électrique brute

$$P_{el,b} = 0.12 \times 54.3 = \boxed{6{,}52\,\text{MW}}.$$

c) Puissance électrique nette

$$P_{el,n} = 6.52 - 1.50 = \boxed{5{,}02\,\text{MW}}.$$

d) Production annuelle nette

$$E_n = 5.02 \times 8000 \simeq \boxed{40{,}2\,\text{GWh/year}}.$$

e) Rôle de la réinjection

Elle permet de fermer la boucle de circulation, de maintenir le débit et la pression, de limiter les rejets de fluide et de réutiliser le même système hydraulique pour extraire de la chaleur du réservoir.

f) Compromis d'exploitation

Augmenter le débit augmente en général la puissance thermique, mais exige davantage de pompage et peut imposer des pressions d'injection plus fortes. Ces pressions peuvent réactiver des fractures

préexistantes et augmenter la sismicité induite. L'objectif n'est donc pas de maximiser le débit à tout prix, mais d'optimiser la puissance nette tout en conservant une circulation durable et un niveau de risque acceptable.

6. Pompe à chaleur géothermique

Éléments de correction

a) Définition

$$COP = \frac{P_{\text{chauff}}}{P_{\text{elec}}}.$$

b) Puissance électrique

$$P_{el} = \frac{20}{4.5} = \boxed{4{,}44\,\text{kW}}.$$

c) Puissance prélevée dans le sous-sol

Le bilan énergétique donne :

$$P_{chauffage} = P_{sol} + P_{el}.$$

Donc :

$$P_{sol} = 20 - 4.44 = \boxed{15{,}6\,\text{kW}}.$$

d) Bilans annuels pour 1800 h

$$E_{chauffage} = 20 \times 1800 = \boxed{36\,\text{MW h}}.$$

$$E_{el} = 4.44 \times 1800 \simeq \boxed{8{,}0\,\text{MW h}}.$$

$$E_{sol} = 15.6 \times 1800 \simeq \boxed{28{,}0\,\text{MW h}}.$$

On vérifie : $36 \simeq 8 + 28$ MWh.

e) Pourquoi le COP peut-il dépasser 1 ?

La pompe à chaleur ne convertit pas seulement l'électricité en chaleur : l'électricité sert à *transférer* vers le bâtiment une quantité supplémentaire de chaleur prélevée dans l'environnement. Il ne s'agit donc pas du rendement d'une conversion d'une seule énergie entrante.

f) Influence des températures

Plus l'écart de température entre la source froide et le circuit de chauffage est faible, moins le compresseur doit fournir de travail et meilleur est le COP. Un plancher chauffant à basse température est ainsi généralement plus favorable qu'un réseau de radiateurs demandant une température élevée.

7. Stock thermique et caractère renouvelable

Éléments de correction

a) Volume et masse

$$V = 1\text{ km} \times 1\text{ km} \times 10\text{ km} = \boxed{10\text{ km}^3 = 1.0 \times 10^{10}\text{ m}^3}.$$

$$m = \rho_r V = 2500 \times 10^{10} = \boxed{2.5 \times 10^{13}\text{ kg}}.$$

b) Refroidissement de $1\,^\circ$C

$$E = mc_r\Delta T = 2.5 \times 10^{13} \times 1000 \times 1 = \boxed{2.5 \times 10^{16}\text{ J}}.$$

Avec 1 TWh $= 3.6 \times 10^{15}$ J :

$$E \simeq \boxed{6{,}94\,\text{TW h}}.$$

c) Refroidissement de $20\,^\circ$C

$$E_{20} = 20 \times 6.94 = \boxed{139\,\text{TW h}}.$$

d) Flux naturel traversant $1\,\text{km}^2$

$$A = 10^6\text{ m}^2, \qquad P = 0.060 \times 10^6 = \boxed{60\,\text{kW}}.$$

e) Comparaison avec une exploitation de 50 MW

$$\frac{50\ \text{MW}}{0.060\ \text{MW}} \simeq \boxed{830}.$$

La puissance extraite est ici plus de huit cents fois supérieure au flux naturel traversant la seule surface supérieure du bloc.

f) Interprétation

La Terre possède un immense stock de chaleur et fournit en permanence un flux thermique. Mais un projet local peut exploiter un **stock** de chaleur beaucoup plus rapidement que le flux naturel ne le recharge. La géothermie est donc renouvelable à l'échelle planétaire et sur le long terme, mais un réservoir donné peut être refroidi ou surexploité. Sa durabilité dépend du débit, de la géométrie, de la réinjection, des transferts de chaleur et du temps laissé à la recharge thermique.

8. Quelle géothermie pour quel usage ?

Éléments de correction

Situation	Solution cohérente
Aquifère superficiel à 12 °C	**Pompe à chaleur géothermique**. La température est trop basse pour un chauffage direct classique, mais constitue une bonne source froide stable.
Aquifère productif à 70 °C sous une agglomération	**Réseau de chaleur sur aquifère profond**. La chaleur peut être valorisée directement après échange thermique.
Eau naturellement circulante à 180 °C en contexte volcanique	**Production électrique hydrothermale**, éventuellement suivie d'usages directs de la chaleur résiduelle.
Granite à 200 °C à 5 km, peu perméable	**Système géothermique stimulé (EGS)** : il faut créer ou améliorer la circulation dans le réseau de fractures.
Source à 45 °C près de serres	**Usage direct de chaleur** pour le chauffage des serres, éventuellement avec appoint ou pompe à chaleur selon la température requise.

Une ressource à température élevée n'est donc pas automatiquement destinée à produire de l'électricité. Le choix dépend aussi du débit, du coût des forages, de la distance aux consommateurs et de la valeur de l'usage thermique possible.

9. Sismicité induite : analyser un scénario

Éléments de correction

a) Mécanisme

L'injection augmente la pression de fluide dans les pores et les fractures. Cette augmentation réduit la contrainte normale effective qui maintient les deux lèvres d'une fracture en contact. Une fracture déjà proche de la rupture peut alors glisser : un séisme est déclenché.

b) Pourquoi rechercher une micro-sismicité ?

Dans un EGS, la stimulation vise à augmenter la transmissivité du réseau de fractures et à connecter les puits. Une micro-sismicité de faible magnitude peut donc servir d'indicateur de la zone effectivement stimulée.

c) Quand devient-elle problématique ?

Elle devient problématique lorsqu'elle sort du domaine des micro-événements attendus, devient perceptible, augmente en magnitude ou en fréquence, menace les bâtiments ou les infrastructures, ou devient socialement inacceptable. Le critère n'est pas seulement physique : il est aussi réglementaire et territorial.

d) Mesures possibles

— réseau local de surveillance sismique avant et pendant les opérations ;
— suivi continu du débit et de la pression d'injection ;
— réduction du débit ou de la pression si l'activité augmente ;

— arrêt temporaire ou définitif de l'injection ;
— adaptation de la stratégie de stimulation ;
— cartographie des failles et établissement d'un état sismique initial ;
— information des riverains et procédures de gestion de crise.

e) Système « feu tricolore »
On définit à l'avance des indicateurs et des seuils. En régime *vert*, les opérations se poursuivent normalement ; en régime *orange*, l'activité sismique conduit à réduire ou modifier l'injection et à renforcer la surveillance ; en régime *rouge*, les opérations sont arrêtées selon le protocole prévu. Les seuils précis dépendent du site et du cadre réglementaire.

Synthèse – La géothermie est-elle renouvelable et durable ?

Éléments de correction

Une réponse complète doit éviter une réponse simplement binaire. La Terre fournit en permanence un **flux** de chaleur issu de son refroidissement et de la production radiogénique, mais l'exploitation géothermique mobilise souvent localement un **stock** thermique accumulé dans les roches et les fluides. À l'échelle planétaire, la ressource est considérable ; à l'échelle d'un réservoir, un débit trop élevé peut provoquer une baisse de pression ou une percée thermique. La **réinjection** améliore le bilan de masse et permet de fermer le circuit, mais elle doit être conçue pour éviter un refroidissement trop rapide du puits producteur. La durabilité dépend donc de la température, du gradient, de la perméabilité, du débit et de la géométrie du réservoir. Les usages doivent aussi être adaptés à la qualité de la ressource : pompe à chaleur pour la très basse énergie, réseau de chaleur pour les aquifères chauds, production électrique pour les températures plus élevées. Enfin, l'exploitation profonde peut engendrer corrosion, dépôts et surtout **sismicité induite**. La géothermie peut donc être une énergie bas-carbone et durable, mais seulement si le réservoir est caractérisé, surveillé et exploité à un rythme compatible avec son comportement thermique et hydraulique.