UE Géoressources – Licence 2 – R. Thiéry

Exploiter la chaleur de la Terre

Gradient géothermique, doublets, réseaux de chaleur, géothermie profonde et pompes à chaleur

Compétences travaillées

À l'issue du TD, vous devrez être capable de :

— relier gradient géothermique, profondeur et température d'une ressource ;
— calculer la puissance thermique extraite d'un fluide géothermal ;
— dimensionner simplement un doublet et un réseau de chaleur ;
— établir le bilan énergétique d'un système géothermique profond ;
— distinguer géothermie superficielle, aquifère profond et système géothermique stimulé ;
— raisonner sur la durabilité d'un réservoir et le risque de refroidissement ;
— analyser les principaux risques associés à l'exploitation géothermique.

Données et conventions

Les valeurs numériques sont volontairement simplifiées afin de travailler sur des ordres de grandeur.

— Température moyenne à la surface : $T_0 = 15\,°\mathrm{C}$.
— Capacité thermique massique de l'eau : $c_p = 4{,}18\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$.
— Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1\,000\,\mathrm{kg/m^3}$.
— Masse volumique d'une roche cristalline : $\rho_r = 2\,500\,\mathrm{kg/m^3}$.
— Capacité thermique massique des roches : $c_r = 1\,000\,\mathrm{J/(kg\,K)}$.
— Flux géothermique continental de référence : $\phi = 60\,\mathrm{mW/m^2}$.
— 1 an = 8760 h ; 1 GWh = 10^6 kWh.
— Pour un fluide : $P_{th} = \dot{m}\, c_p\, \Delta T$.
— Pour un volume rocheux : $E = \rho_r\, V\, c_r\, \Delta T$.

A. Identifier une ressource géothermique

1. QCM de mise en route. Pour chaque proposition, indiquez si elle est vraie ou fausse et justifiez brièvement.

a) Le gradient géothermique est une température exprimée en degrés Celsius.

b) Un fort gradient permet d'atteindre une température donnée à plus faible profondeur.

c) Toute roche chaude constitue nécessairement un gisement géothermique directement exploitable.

d) Dans un doublet géothermique, la réinjection permet notamment de maintenir la pression du réservoir et de limiter les rejets de fluide en surface.

e) Une pompe à chaleur géothermique produit de la chaleur uniquement à partir d'électricité.

f) Une ressource géothermique peut se refroidir localement si l'extraction de chaleur est plus rapide que sa recharge thermique.

2. Gradient géothermique et profondeur d'exploitation. On considère deux contextes :

— contexte A : gradient moyen $g_A = 3\,^\circ\mathrm{C}/100\mathrm{m}$;

— contexte B : anomalie thermique du nord de l'Alsace, $g_B = 10\,^\circ\mathrm{C}/100\mathrm{m}$.

On supposera le gradient constant et l'on utilisera :

$$T(z) = T_0 + g\,z.$$

a) Calculez la température à 2 000 m puis à 4 000 m dans les deux contextes.

b) À quelle profondeur atteint-on 80 °C dans chaque contexte ?

c) À quelle profondeur atteint-on 150 °C ?

d) Expliquez pourquoi une anomalie géothermique modifie fortement l'intérêt économique d'un projet.

e) Citez au moins deux raisons pour lesquelles l'extrapolation linéaire précédente ne suffit pas à démontrer l'existence d'un gisement exploitable.

B. Un doublet géothermique pour alimenter un réseau de chaleur

3. Exploitation d'un aquifère profond. Un doublet exploite un aquifère à environ 1 800 m. L'eau est produite à 75 °C et réinjectée à 35 °C. Le débit de production est de $250\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$.

a) Convertissez le débit volumique en débit massique $\dot{m}$ en kg/s.

b) Calculez la puissance thermique extraite du fluide.

c) Le réseau fonctionne à cette puissance équivalente pendant 4 500 h/year. Calculez l'énergie thermique annuelle livrée.

d) Un logement raccordé consomme en moyenne 8 MWh/year de chaleur. Combien de logements pourrait-on théoriquement alimenter ?

e) Pourquoi réinjecte-t-on l'eau refroidie plutôt que de la rejeter en surface ? Donnez au moins trois raisons.

4. Refroidissement du réservoir : une estimation très simple. On suppose que le doublet précédent mobilise principalement un volume d'aquifère de $3\,\mathrm{km}^2$ de surface, de 100 m d'épaisseur et de porosité $n = 15\,\%$.

a) Calculez le volume total de roche puis le volume d'eau contenu dans les pores.

b) En divisant ce volume d'eau par le débit d'exploitation, estimez un temps caractéristique correspondant au renouvellement d'un volume de pores.

c) Pourquoi ce temps ne doit-il surtout pas être interprété comme une durée de vie exacte du doublet ?

d) Quel phénomène finit par limiter un doublet si l'eau froide réinjectée atteint trop rapidement le puits de production ?

e) Sur quels paramètres peut-on agir pour retarder ce phénomène ?

C. Géothermie profonde : produire de l'électricité

5. Cas simplifié inspiré d'un système géothermique profond de type Soultz-sous-Forêts. De l'eau circule dans un réservoir fracturé profond. On retient les valeurs pédagogiques suivantes :

$$T_{prod} = 200\,^{\circ}\mathrm{C}, \qquad T_{inj} = 70\,^{\circ}\mathrm{C}, \qquad Q = 100\,\mathrm{L/s}.$$

a) Calculez la puissance thermique extraite du fluide.

b) Une centrale à cycle binaire convertit 12 % de cette puissance thermique en électricité. Quelle puissance électrique brute obtient-on ?

c) Les pompes et auxiliaires consomment 1,5 MW. Calculez la puissance électrique nette.

d) La centrale fonctionne 8 000 h/year. Quelle est sa production électrique annuelle nette ?

e) Pourquoi la réinjection est-elle particulièrement importante dans un système géothermique profond ?

f) Quel compromis faut-il rechercher entre débit, pression d'injection, récupération de chaleur et sismicité induite ?

D. Géothermie très basse énergie : la pompe à chaleur

6. Chauffer un bâtiment avec le sous-sol. Un bâtiment nécessite une puissance de chauffage de 20 kW. Une pompe à chaleur géothermique a un coefficient de performance $COP = 4.5$.

a) Rappelez la définition du COP.

b) Calculez la puissance électrique consommée par la pompe à chaleur.

c) Calculez la puissance thermique prélevée dans le sous-sol.

d) Pour 1 800 h/year équivalentes de fonctionnement, calculez : l'énergie de chauffage livrée, l'électricité consommée et la chaleur prélevée dans le sous-sol.

e) Expliquez pourquoi le COP n'est pas un rendement énergétique au sens classique et peut être supérieur à 1.

f) Pourquoi les performances d'une pompe à chaleur dépendent-elles de la température de la source froide et de la température demandée dans le bâtiment ?

E. Stock thermique et caractère renouvelable de la géothermie

7. Combien de chaleur contient un volume de croûte ? On reprend l'idée d'un bloc de roche de 1 km×1 km×10 km.

a) Calculez son volume en m^3 puis sa masse.

b) Calculez l'énergie libérée si l'ensemble du bloc se refroidit de 1 °C. Exprimez le résultat en joules puis en TWh.

c) Même question pour un refroidissement de 20 °C.

d) La puissance géothermique naturelle traversant la face supérieure de 1 km^2 est donnée par $P = \phi A$. Calculez-la.

e) Comparez cette puissance naturelle avec une exploitation délivrant 50 MW thermiques.

f) Que montre cette comparaison sur le caractère « renouvelable » de la géothermie à l'échelle d'un réservoir exploité ?

F. Choisir une technologie et gérer les risques

8. Quelle géothermie pour quel usage ? Associez chaque situation à la solution la plus cohérente parmi : *pompe à chaleur géothermique ; usage direct de chaleur ; réseau de chaleur sur aquifère profond ; production d'électricité hydrothermale ; système géothermique stimulé (EGS).*

Situation	Solution proposée et justification
Aquifère superficiel à 12 °C sous un immeuble	
Aquifère productif à 70 °C sous une agglomération	
Eau naturellement circulante à 180 °C en contexte volcanique	
Granite à 200 °C à 5 km, mais très peu perméable	
Source à 45 °C près de serres agricoles	

9. Sismicité induite : analyser un scénario. Lors de la stimulation hydraulique d'un réservoir profond, le débit et la pression d'injection sont progressivement augmentés. Une micro-sismicité apparaît, puis quelques événements deviennent perceptibles en surface.

a) Expliquez le lien possible entre injection de fluide et déclenchement de séismes sur des fractures préexistantes.

b) Pourquoi une certaine micro-sismicité peut-elle être recherchée lors de la création d'un réservoir EGS ?

c) À partir de quel moment cette sismicité devient-elle un problème pour l'exploitation ?

d) Proposez quatre mesures de surveillance ou de réduction du risque.

e) Expliquez en quelques phrases le principe d'un système de gestion de type « feu tricolore ».

Question de synthèse

Rédigez une conclusion de dix à quinze lignes répondant à la question suivante : *la géothermie est-elle une énergie renouvelable et durable ?*
Votre réponse devra distinguer au minimum : **flux** et **stock** de chaleur, **échelle globale** et **échelle du réservoir**, et mobiliser les notions de **gradient géothermique**, **débit**, **réinjection**, **refroidissement du réservoir**, **pompe à chaleur** ou **réseau de chaleur**, et **sismicité induite**.