

Annexe 5

Calculer le gradient géothermique et le flux géothermique existant au Québec à partir de l'étude de données de températures issues de forages réalisés dans une ancienne exploitation minière : les mines Gaspé à Murdochville.

Compétences :    

Les Mines Gaspé sont situées à proximité de Murdochville (Québec, document 1). Des gisements de cuivre ont été exploités de 1951 à 1999 à ciel ouvert et en galeries. Après la fermeture des mines, l'eau souterraine a inondé une partie des galeries. Cette eau est réchauffée par la chaleur du milieu souterrain et forme maintenant un réservoir d'énergie géothermique.

Le réseau de galeries souterraines des Mines Gaspé se situe au cœur d'une séquence de roches sédimentaires calcaires. Une intrusion de roche granodioritique recoupe les bancs de roches sédimentaires au centre du site. L'eau des galeries inondées est en équilibre thermique avec les roches qui l'entourent. La température de l'eau en profondeur reflète donc la température des roches qui sont en contact.

Dans le tableau du document 2, les températures de l'eau de 4 puits de forage d'exploration ont été relevées sur le site des Mines Gaspé.



Document 1 : Localisation de la ville de Murdochville (point A) au Québec à proximité de laquelle se situe le site des Mines Gaspé. *Source : google map.*

Profondeur (m)	Forage 30-0840 Date 01/08/05 Élévation du collet (m A.D.N.M.) 758,92	Forage 30-0860 Date 01/08/05 Élévation du collet (m A.D.N.M.) 669,08	Forage 30-0858 Date 01/08/05 Élévation du collet (m A.D.N.M.) 687,75	Forage 30-0857 Date 02/08/05 Élévation du collet (m A.D.N.M.) 630,09
0	18,81	20,22	16,70	28,07
10	13,15	19,52	16,00	27,34
20	8,78	18,11	14,94	19,87
30	8,04	12,80	13,87	9,89
40	6,52	6,52	8,78	6,14
50	4,98	4,98	6,14	4,19
60	3,39	3,39	4,58	2,99
70	3,39	3,39	3,79	2,99
80	2,99	2,99	3,39	2,99
90	2,99	3,39	3,39	2,99
100	2,99	3,39	3,39	3,39
110	2,99	3,39	3,39	3,39
120	2,99	3,79	3,39	3,39
130	2,99	3,79	3,39	3,79
140	2,99	4,19	3,39	3,79
150	3,39	4,19	3,79	4,19
160	3,39	4,19	3,79	4,19
170	3,39	4,58	3,79	4,19
180	3,39	4,58	4,19	4,58
190	3,39	4,58	4,19	4,58
200	3,79	4,98	4,19	4,58
206	3,79	4,98	4,58	4,98
216	3,79	4,98	4,58	4,98
226	3,79	5,37	4,58	4,98
236	3,79	5,37	4,58	5,37
246	4,19	5,37	4,98	5,37
256	4,19	5,75	4,98	5,37
266	4,19	5,75	4,98	5,75
276	4,19		5,37	5,75
286	4,58		5,37	5,75
296	4,58		5,37	6,14

(m A.D.N.M = mètre au dessus du niveau de la mer)

Document 2 : Tableau des températures de l'eau en fonction de la profondeur dans 4 forages d'exploration sur le site des mines Gaspé.

« Les mesures de température ont été effectuées dans des forages d'exploration. Elles sont mesurées avec un enregistreur ayant une précision de 0,4 °C. »

Tableau et texte tirés de :

<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/23912/apb.html#d0e2280>

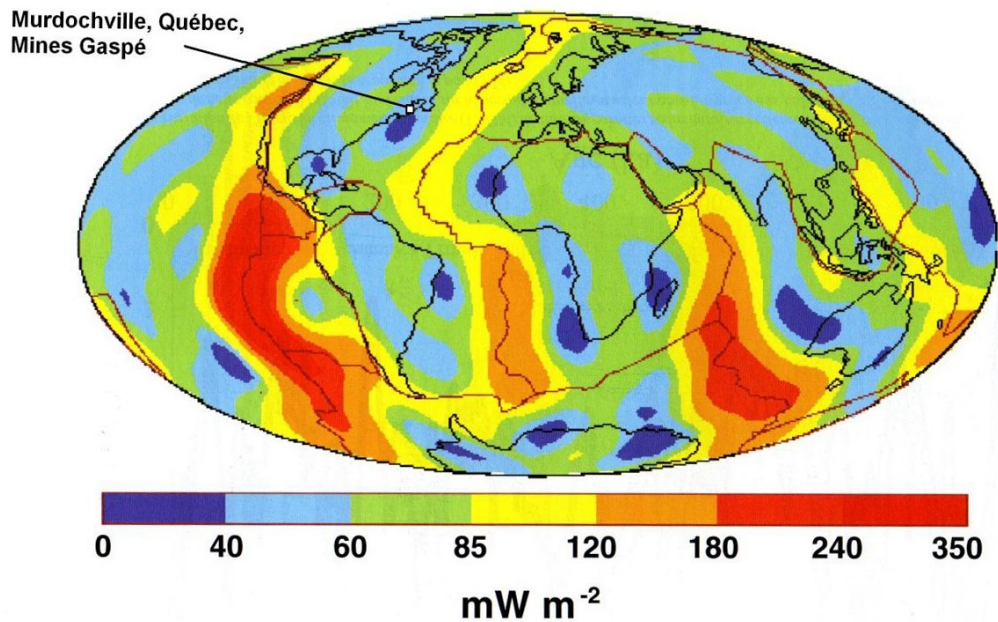
Le **gradient géothermique** correspond au rapport entre la variation de température entre deux points et la distance entre ceux-ci.

Le **flux de chaleur** correspond à la quantité de chaleur (en joule) traversant une unité de surface (m^2) par unité de temps (s) : $Watt.m^{-2}$ ou $J.s^{-1}.m^{-2}$.

Dans la croûte continentale (cas de notre exemple des Mines Gaspé), le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température multiplié par un coefficient qui dépend des roches traversées, c'est le coefficient appelé conductivité thermique λ .

La conductivité thermique représente la capacité d'un solide à conduire la chaleur (plus précisément, c'est la capacité d'un solide à propager facilement des vibrations thermiques). λ s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$ ou $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.

Document 3 : le gradient géothermique et le flux géothermique



Document 4 : Carte mondiale du flux de chaleur

Source : Larroque C., Virieux J. *Physique de la Terre solide. Observations et théories. Chapitre 5 : La géothermie.* Gordon and Breach Science Publisher. Collection Géosciences. ISBN 2-84703-002-6. 360p.

système	température du fluide circulant	gradient géothermique (°C pour 100 mètres)	Flux de chaleur (mW/m²)	caractéristiques géologiques
hyperthermique	>150°C	de 10 à 50°C	>200	zones de subduction - rift
semithermique	100°C < T < 150°C	de 3 à 10°C	100 à 200	fossé d'effondrement
thermique diffus	T < 100°C	1 à 3	60-100	bassin sédimentaire

Document 5 : Les trois types de géothermie

Source : http://accres.inrp.fr/eedd/climat/dossiers/energie_demain/geothermie/geothermie_SVT

- **en limite de plaque lithosphérique:**
 - sur les dorsales: Islande (49MW), Açores (5MW), Californie (2817MW)
 - dans les zones de subduction (70% de l'énergie géothermique actuellement exploitée), Philippines (1127MW), Japon (414MW)
 - dans les zones de collision: Italie (631MW): les plissements et les failles observés dans ces zones favorisent la remontée de magma et sont donc responsables d'une anomalie thermique
- **au niveau de points chauds:** Hawaïi (25MW)
- **dans les fossés d'effondrement:** des failles profondes associées à un amincissement de la lithosphère favorisent une anomalie thermique positive
- **dans les zones stables:** c'est souvent dans des bassins sédimentaires où des couches géologiques s'accumulent: certaines sont perméables et vont jouer le rôle d'aquifères: très souvent ces aquifères sont très étendus ce qui rend le stock de chaleur particulièrement important.

Exemples: France (337MW), USA (1874MW)

Document 6 : Relation entre les sites géothermiques actuellement exploités et le contexte de tectonique des plaques

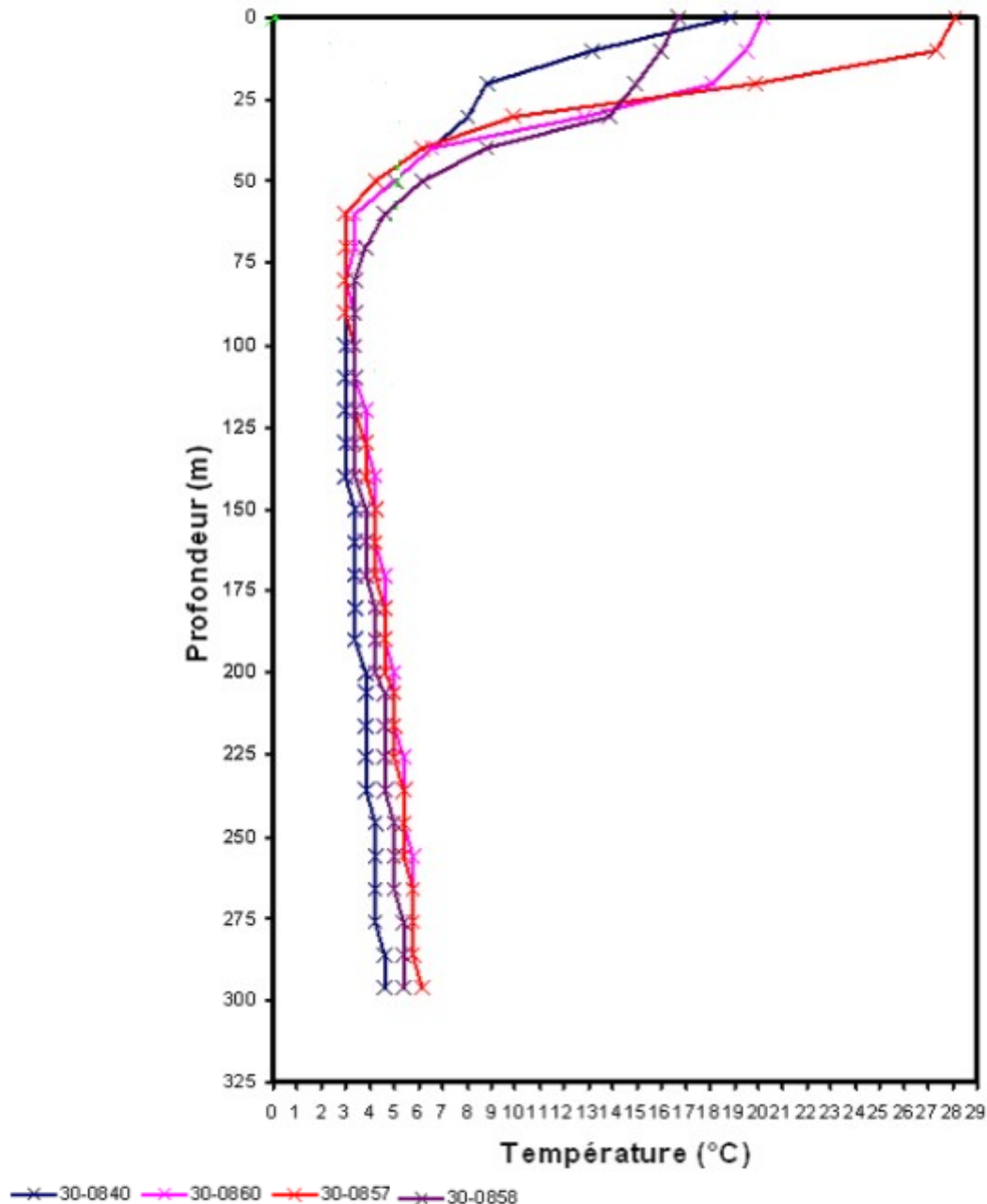
Source : http://accres.inrp.fr/eedd/climat/dossiers/energie_demain/geothermie/geothermie_SVT

Questions :

1. Réaliser un graphique montrant l'évolution de la température de l'eau donc de la roche encaissante en fonction de la profondeur pour les 4 forages.
Aide : quelles sont les valeurs à placer en abscisse ? En ordonnée ?
Choisir une échelle appropriée.
L'axe des ordonnées, représentant la profondeur, vous dirigerez l'axe vers le bas de votre feuille.
Possibilité de réaliser cette question en utilisant un tableur grapheur.
2. Décrire l'évolution de la température en fonction de la profondeur au delà des 75 premiers mètres de profondeur.
Il ne sera tenu compte que des valeurs de température au-delà des 75 premiers mètres de profondeur. Dans cette partie superficielle du sous-sol, le gradient géothermique est modifié car il existe des échanges thermiques entre l'atmosphère et le sous-sol.
3. Pour pouvoir comparer l'évolution de température en fonction de la profondeur entre différents lieux à la surface du globe, on utilise 2 notions : le gradient géothermique et le flux géothermique (document 3).
Suite à des mesures réalisées en laboratoire, la conductivité thermique des roches présentes au niveau des mines Gaspé est estimée $4,09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
 - a) Traduire la définition du gradient géothermique sous forme mathématique.
Considérons 2 points 1 et 2 à des profondeurs z_1 et z_2 , le point 2 étant plus profond que le point 1.
Au point 1, il règne une température T_1 et au point 2, une température T_2 .
 - b) Calculer le gradient géothermique en $^{\circ}\text{C/m}$ et en $^{\circ}\text{C/km}$ pour les 4 puits de forage
Sélectionner une partie de la courbe correcte pour effectuer ce calcul
 - c) Calculer le flux géothermique au niveau des Mines Gaspé au Québec.
 - d) Vérifier la cohérence de vos calculs grâce au document 4.
4. Identifier le type de géothermie des mines Gaspé et indiquer à quel contexte de tectonique des plaques cette géothermie correspond (documents 5 et 6).

Correction

- Question 1 :



Source : <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/23912/apb.html#d0e2280>

- Question 2 :

Pour les forages, la température diminue sur les 75 premiers mètres puis elle augmente progressivement pour passer de 3°C environ à 75m de profondeur à 5 ou 6°C à 300m de profondeur.

Une explication de la variation de température pour les 75 premiers mètres de profondeur est fournie sur le site suivant :

<http://www.geothermie-perspectives.fr/pdf/De%20la%20chaleur%20%C3%A0%20la%20ressource.pdf>

« La lenteur de la diffusion thermique permet aux variations de la température du sol de se propager en profondeur [...] »

• **Question 3 :**

- a) Gradient géothermique = $(T_2 - T_1) / (z_2 - z_1) = dT / dz$
b) Calcul des gradients géothermiques pour les différents forages

Profondeur		Température mesurée dans le forage			
		30-0840	30-0860	30-0858	30-0857
à 80 m		2,99	2,99	3,39	2,99
à 266 m		4,19	5,75	4,98	5,75
Gradient Géothermique	En °C/m	0,0065	0,014	0,0085	0,014
	En °C/km	6,5	14	8,5	14
	En K/km	6,5	14	8,5	14

Rappel $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$

- c) Le flux géothermique = $\lambda \times \text{gradient géothermique}$

Ou, on peut également trouver cette définition du flux :

$$J = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

Le signe – est justifié par le fait que le flux de chaleur est dirigé vers le haut et que z est orienté vers le bas.

Attention aux unités pour le calcul :

λ est estimée $4,09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Pour le forage 30-0860 et 30-0857, le flux géothermique = $4,09 \times 0,014 = 0,05726 \text{ W.m}^{-2}$
soit 57 mW.m^{-2}

- d) Le résultat du calcul du flux géothermique est cohérent avec la valeur indiquée sur la carte mondiale du flux de chaleur (document 4).
Les résultats des calculs du gradient géothermique et du flux géothermiques sont cohérents avec les résultats calculés pour l'étude réelle.

Exemples de mesures de gradient géothermique dans des forages de Murdochville

« Le gradient géothermique moyen mesuré dans les forages 30-0840, 30-0860, 30-0858 et 30-0857 est de $0,012 \text{ }^{\circ}\text{C/m}$. Ce gradient stable indique que la température de l'eau augmente en fonction de la profondeur. La température de l'eau souterraine à la surface de la nappe est d'environ $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. À l'endroit du puits 1100, la température de l'eau peut atteindre au moins $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à 300 mètres de profondeur. Considérant une conductivité thermique moyenne de $4,09 \text{ W/m K}$, le flux de chaleur au site des Mines Gaspé est estimé à 49 mW/m^2 . Drury et al. (1987) ont mesuré un gradient géothermique et un flux de chaleur semblable avec des instruments de haute précision dans la région de Murdochville, soit $0,0131 \text{ }^{\circ}\text{C/m}$ et 50 mW/m^2 , respectivement. »

Profondeur (m)	Forage 30-0840	Forage 30-0860	Forage 30-0858	Forage 30-0857
	Date 01/08/05	Date 01/08/05	Date 01/08/05	Date 02/08/05
	Élévation du collet (m A.D.N.M.)	Élévation du collet (m A.D.N.M.)	Élévation du collet (m A.D.N.M.)	Élévation du collet (m A.D.N.M.)
	758,92	669,08	687,75	630,09
Gradient géothermique ($^{\circ}\text{C/m}$)	0,0088	0,0144	0,0119	0,0143

- **Question 5 :**

Les mines Gaspé correspondent à une géothermie thermique diffuse que l'on trouve dans les bassins sédimentaires.

Bilan de l'activité :
- Dans le sous-sol, la température augmente avec la profondeur.
- Le rapport entre la différence de température entre deux points et la différence de profondeur entre ces deux points permet de définir le gradient géothermique.
- De la chaleur est produite par les différentes enveloppes du globe* et atteint la surface de la terre. La quantité de chaleur (en joule) traversant une unité de surface (m^2) par unité de temps (s) correspond au flux de chaleur (en Watt.m^{-2} ou $\text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$).
- Dans l'exemple des mines Gaspé au Québec, qui correspond à un bassin sédimentaire, en analysant la température des 300 premiers mètres, le gradient géothermique est de 10°C/km et le flux est proche de 50 mW.m^{-2} .

* Pour plus d'information :

Voir exercice p.110 issu de [J-Y Daniel](#), [C. Aubourg](#), [P. De Wever](#), Exercices corrigés de sciences de la terre et de l'univers, [Vuibert](#), novembre 2000. ISBN : 271175281X, 352 p.)