

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
ENP D'ORAN – MAURICE AUDIN

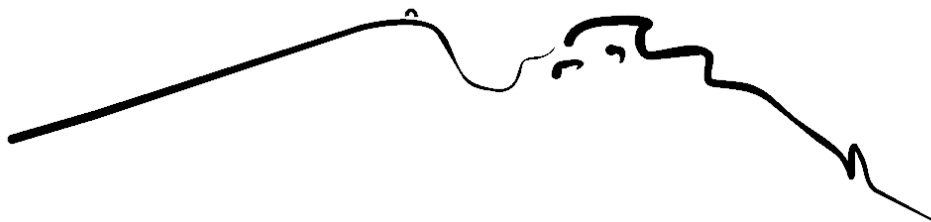
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



SUPPORT DE COURS N° 7

Formation d'Ingénieurs

« ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE »



Enseignant : Dr. Sid Ali LITIM

I. Introduction

La géothermie occupe actuellement une place de plus en plus importante au sein des énergies renouvelables. Issu de la chaleur naturelle du sous-sol, son potentiel énergétique est immense et ses utilisations sont multiples (chauffage, production d'électricité, échanges thermiques, etc.).

Durant ce chapitre, nous aborderons les principes élémentaires de ce phénomène naturel (température interne du globe, gradient géothermique, flux de chaleur, etc.), indispensables pour comprendre le fonctionnement des systèmes géothermiques. Puis les principales utilisations de la géothermie seront abordées à différentes échelles (mondiale, européenne, Algérienne) et dans divers contextes géologiques correspondant à des niveaux d'énergies différents.

II. Géothermie et propriétés thermiques de la terre

La température à la surface de la terre est liée à 2 apports énergétiques. L'énergie solaire, d'origine externe au globe terrestre, fournit un flux thermique d'origine externe. Un flux thermique dont l'origine est interne se dirige aussi vers la surface.

II. Exploitation de l'énergie thermique interne à la Terre

Cette énergie thermique interne peut être exploitée de différentes manières pour chauffer des habitations (géothermie à basse énergie) ou pour produire de l'électricité dans des centrales géothermiques industrielles (géothermie haute énergie).

III. Les utilisations de l'énergie thermique

III.1. Géothermie très basse énergie (Géothermie assistée par pompe à chaleur)

La géothermie très basse énergie (température inférieure à 30 °C) ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange. Elle nécessite la mise en œuvre de pompes à chaleur (PAC) qui prélèvent cette énergie à basse température pour l'augmenter à une température suffisante pour le chauffage. Mais, au-delà du chauffage, les applications de la géothermie sont très diverses : chauffage et rafraîchissement des logements individuels, collectifs ou tertiaires, usage industriel, etc.

Les pompes à chaleur géothermiques destinées aux maisons individuelles, bâtiments collectifs et tertiaires.

La chaleur est puisée dans le sol par des capteurs qui peuvent être enterrés verticalement ou horizontalement, ou dans l'eau des nappes.

III.1.1. Capteurs horizontaux

Les capteurs horizontaux sont répartis et enterrés à faible profondeur (de 0,60 m à 1,20 m). Selon la technologie employée, de l'eau glycolée ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur circule en circuit fermé à l'intérieur de ces capteurs. La surface de capteurs nécessaire représentera environ 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Pour une maison de 150 m², les capteurs occuperont donc entre 225 et 300 m² du jardin (figure 1).

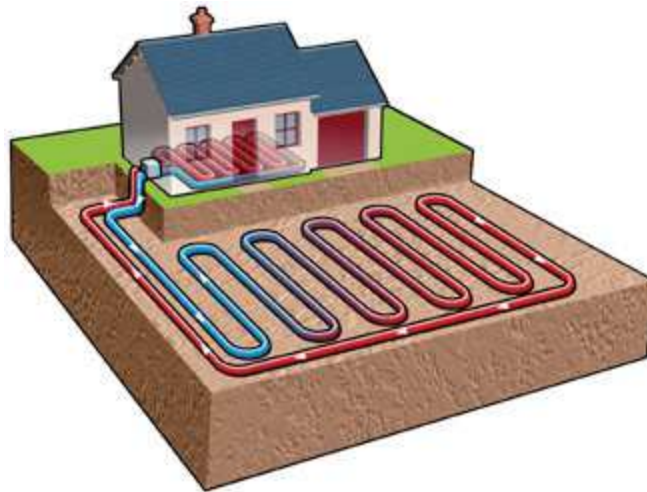


Figure 1. Schéma d'un capteur géothermique horizontal

III.1.2. Sondes géothermiques verticales

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment (figure 2). La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée. L'emprise au sol est minimale par rapport aux capteurs horizontaux.

Pour chauffer une maison de 120 m² habitables, une sonde géothermique de 100 m de profondeur est suffisante.

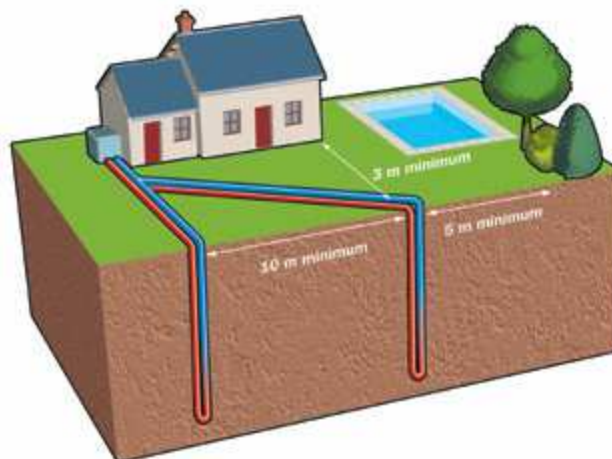


Figure 2. Schéma d'une sonde géothermique verticale

III.1.3. Les pompes à chaleur sur nappes ou sur aquifères

Les pompes à chaleur sur nappes puisent la chaleur contenue dans l'eau : nappes phréatiques (où la température de l'eau est constante entre 7 et 12 °C), rivière ou lac (figure 3). Elles nécessitent deux forages pouvant atteindre chacun plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur. Ce type d'installation permet de fournir le chauffage et rafraîchissement aux bâtiments collectifs ou tertiaires.

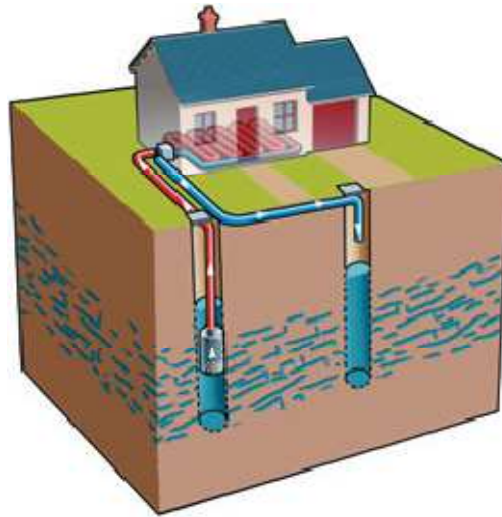


Figure 3. Schéma d'une pompe à chaleur installée sur une nappe d'eau

III.1.4. Les champs de sondes

Pour chauffer des grands bâtiments ou un groupe de logements, il est possible d'installer plusieurs sondes géothermiques sur le même site afin d'obtenir un plus grand potentiel de chaleur terrestre. Les sondes sont installées à intervalles réguliers à des profondeurs variant de 30 m à plusieurs centaines de mètres, et sont raccordées à une ou plusieurs pompes à chaleur.

III.1.5. Fondations thermoactives

Certains grands bâtiments nécessitent pour des raisons de portance d'être construits avec des fondations sur pieux en béton. Il est possible d'équiper ces pieux avec des capteurs (tubes de polyéthylène placés au cœur du pieu) et de connecter ce système de captage à une pompe à chaleur pour fournir de la chaleur ou du froid au bâtiment.

III.1.6. Les autres usages de la géothermie

III.1.6.1. Les puits canadiens (ou provençaux)

Les puits canadiens (ou provençaux) consistent à tempérer l'air extérieur alimentant un bâtiment, en utilisant l'inertie thermique du sol. L'air circule dans un conduit enterré qui, selon les saisons et les conditions climatiques, refroidit (puits provençaux) ou réchauffe (puits canadiens) le bâtiment.

III.1.6.2. Le geocooling

Le sous-sol, dont la température à quelques mètres de profondeur est d'environ 10 à 12°C, peut aussi faire office de source de froid pendant l'été et permettre le rafraîchissement des bâtiments. C'est le principe du geocooling qui consiste à utiliser cette fraîcheur du milieu naturel, en période estivale, pour assurer directement et sans mise en service de pompe à chaleur, le refroidissement direct des bâtiments, via des émetteurs suffisamment étendus, comme des planchers rafraîchissants.

III.1.6.3. La récupération de chaleur sur les eaux usées

Lors de leur évacuation, les eaux usées ont une température moyenne comprise entre 10 et 20 °C (selon la région et les saisons). Issues des cuisines, salles de bains, lave-linge et lave-vaisselle, les calories de ces eaux grises peuvent être mises à profit pour le chauffage des bâtiments. Ce système

fonctionne grâce à un échangeur thermique qui récupère les calories dans les canalisations d'évacuation et les transfère au bâtiment via une pompe à chaleur.

III.2. Géothermie basse et moyenne énergie

III.2.1 Cogénération et usage direct de la chaleur issue de la géothermie profonde

La géothermie basse et moyenne énergie repose sur l'utilisation directe de la chaleur de l'eau chaude contenue dans les aquifères profonds, dont la température est comprise entre 30 et 150 °C.

III.2.2. Réseaux de chaleur et doublets géothermiques

Le chauffage d'un quartier ou d'un ensemble d'immeubles d'habitat collectif peut s'effectuer par l'intermédiaire d'un réseau de chaleur, c'est-à-dire un réseau de canalisations chargé de distribuer la chaleur dans des sous-stations au pied de chaque immeuble ou de chaque groupe d'immeubles. Afin d'assurer une gestion durable de la ressource, la technique du doublet (un puits de production et un puits de réinjection) est généralement mise en œuvre. Elle permet de restituer l'intégralité des volumes d'eau extraits au milieu naturel d'origine (dans la même nappe).

La conception des forages intègre d'une part, la nécessité d'espacer les impacts au niveau du réservoir pour éviter le refroidissement de la ressource au point de prélèvement (puits déviés) et d'autre part, la nécessité de mobiliser des débits d'exploitation importants (jusqu'à 350 m³/h) pour valoriser au mieux le dispositif et disposer d'une puissance thermique compatible avec les besoins du réseau. L'eau contenue dans les nappes profondes est généralement très salée et nécessite des précautions particulières pour son transport entre les puits et la centrale.

III.3. Géothermie haute énergie

III.3.1. Production d'électricité géothermique

La production d'électricité d'origine géothermique est possible sur les réservoirs dont la température est comprise entre 150 et 350 °C et permettant des débits de production de fluides suffisants (figure 4).

Plusieurs méthodes et techniques de production d'électricité géothermiques existent actuellement :

- Pour les sources de vapeur haute température, que l'on retrouve notamment sur les zones de volcanisme récent, l'électricité peut être produite directement par injection de la vapeur dans une turbine haute pression (simple flash) ou haute et basse pression (double flash).
- Pour les sources moins chaudes (moins de 175 °C), de nombreuses techniques (ex : cycle binaire) jouent sur la condensation puis la détente du fluide secondaire, souvent organique (Organic Rankine Cycle, ORC). Ce cycle binaire peut également valoriser l'énergie des eaux chaudes en sortie d'une unité haute pression.
- La géothermie dite conventionnelle vise à exploiter des réservoirs naturellement très perméables, où l'eau géothermale est abondante.
- La technologie « Enhanced Geothermal Systems » (EGS) dite aussi système géothermique stimulé, consiste à augmenter la perméabilité de la roche par stimulation, puis à faire circuler de l'eau dans les roches chaudes à grande profondeur et enfin à exploiter la chaleur récupérée pour produire de l'électricité. La première centrale de production électrique à partir de la géothermie profonde (EGS) a été inaugurée à Soultz-sous-Forêts en juin 2008

(France). Elle dispose d'une puissance de 1,5 MW injectée sur le réseau d'électricité de Strasbourg.

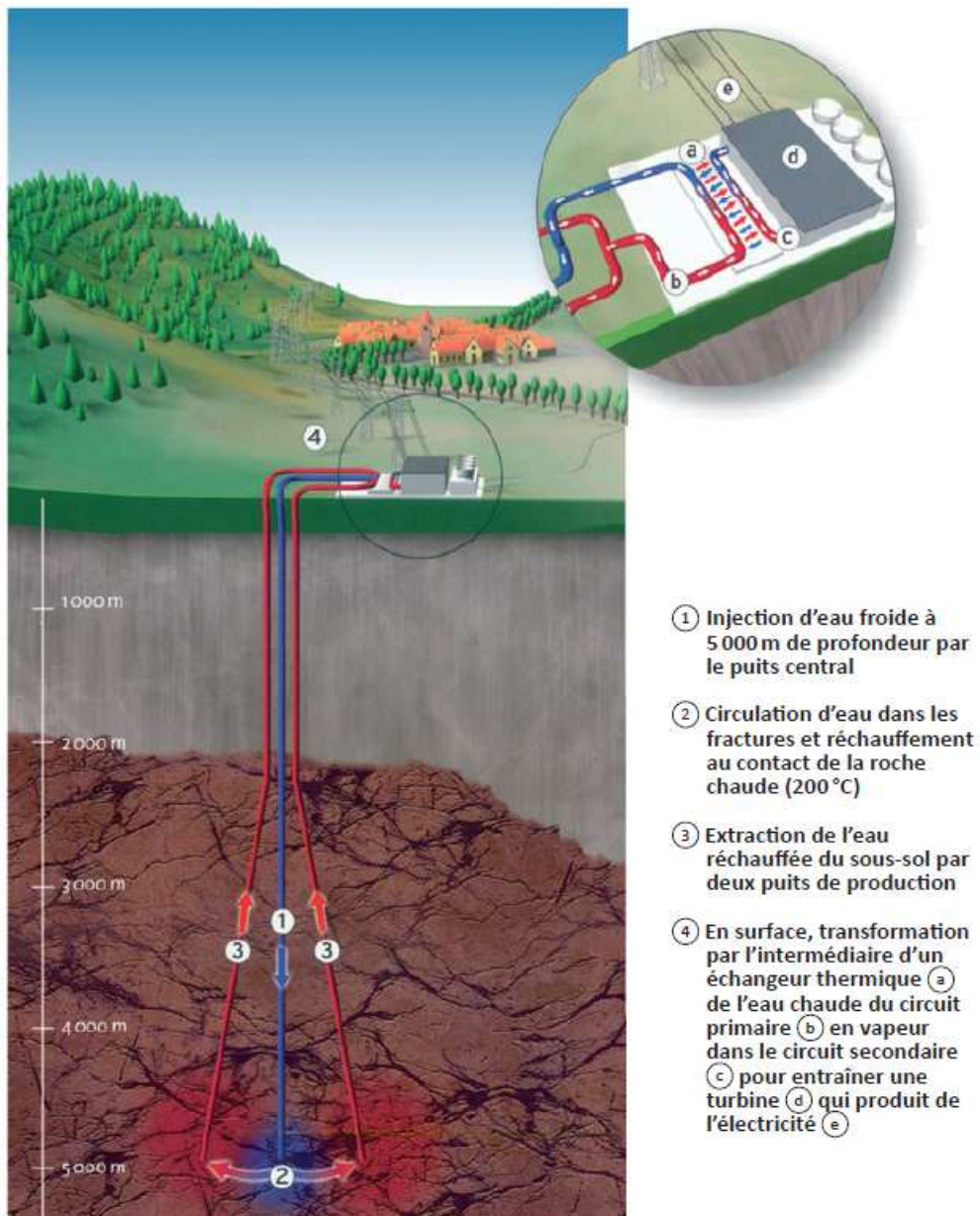


Figure 4. Production d'électricité géothermique à haute énergie

III.3.1.1. Processus de production d'électricité géothermique à base de vapeur d'eau

La chaleur terrestre n'est pas exploitable partout de la même façon. Dans les zones volcaniques, à la frontière des plaques lithosphériques, la chaleur du centre de la Terre remonte et réchauffe de gigantesques poches d'eau.

Comme l'indique la figure 5, l'eau est alors présente dans le sous-sol sous forme liquide ou sous forme de vapeur. Cette vapeur va permettre de faire tourner une turbine, qui, accouplée d'un alternateur, produira de l'électricité.

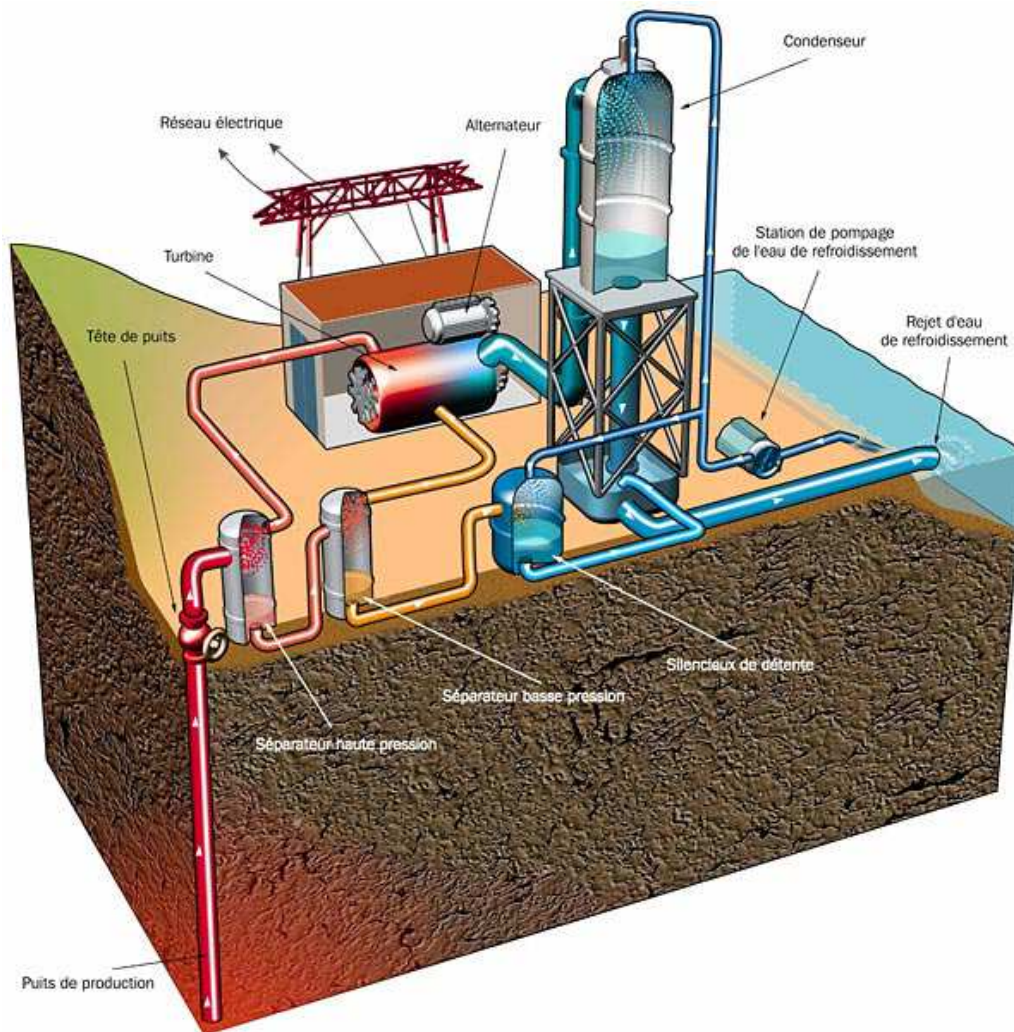


Figure 5. Processus d'électricité géothermique à base de vapeur d'eau

Remarque : Ce qui va conditionner le développement de ce système est sa rentabilité économique. Pour l'instant, ce système coûte cher car il nécessite des forages à grande profondeur dans un milieu encore mal connu.

IV. Le gradient géothermique

IV.1. Observations de terrain

Les sources thermales, connues depuis le début des temps historiques, sont sans doute les manifestations les plus populaires de la présence en profondeur de températures plus élevées qu'en surface. Le village de Chaudes-Aigues dans le Cantal en France doit son nom aux sources thermales qui y sont utilisées : l'hiver pour le chauffage des habitations et l'été pour les thermes. Ce village possède une trentaine de sources dont les températures vont de 40°C à 82°C. La source la plus chaude est celle du Par (figure 6), qui doit son nom au dépeçage à l'eau chaude du cochon (« parage ») que l'on y réalisait. Cette source a un débit de 450000 litres par jours d'eau à 82°C.



Figure 6. Source thermale du Par (82°C) à Chaudes Aigues dans le Cantal

Dans le cas des sources thermales, la température élevée de l'eau est interprétée comme résultat de l'interaction avec des roches de température élevée en profondeur. Une méthode plus directe pour observer l'augmentation de la température avec la profondeur est de descendre dans les mines. Afin d'extraire des substances minérales utiles, des conduits creusés dans l'encaissant descendent parfois à plusieurs centaines de mètres de profondeur et cette valeur est suffisante pour ressentir l'élévation de la température. Un exemple est la mine de Potosi en Bolivie : elle est connue à la fois pour la richesse de son gisement d'argent et pour l'atrocité des conditions de travail des amérindiens. Les sources thermales comme les mines montrant une augmentation de température avec la profondeur, tachons désormais de quantifier cette augmentation (gradient géothermique) et d'en déduire le flux de chaleur.

IV.2. Comment mesure t'on le gradient géothermique et le « flux de chaleur »

La façon la plus simple de mesurer le gradient géothermique est d'enregistrer la variation de la température avec la profondeur dans un forage. C'est ce qui a été fait – avec une précision de 0,005 °C – dans de nombreux forages au cœur des grands bassins du Nevada (aux Etats-Unis) dont un enregistrement est présenté dans la figure 7. Cette figure montre que la température augmente quasi-linéairement lorsqu'on s'enfonce à une profondeur de 1600 m. En moyenne la température augmente de 80 °C/km dans ce forage. C'est ce qui est représenté de graphique de droite qui représente le gradient géothermique, c'est-à-dire la dérivée de la courbe de gauche.

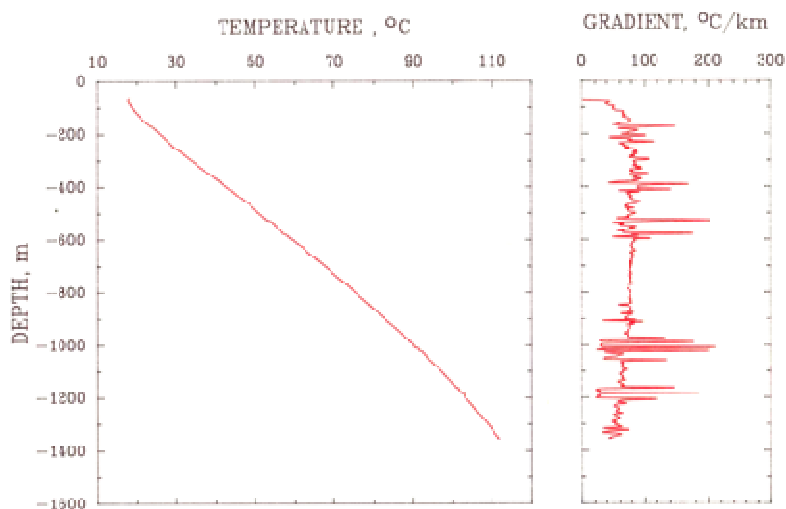


Figure 7. Enregistrement de la température en fonction de la profondeur dans le forage LAH (Nevada, États Unis) et gradient géothermique associé.

Une fois le gradient connu, les géophysiciens en déduisent le flux de chaleur, c'est-à-dire la quantité d'énergie (thermique) qui traverse une unité de surface par unité de temps (unité = J/s/m² ou W/m²). La loi de Fourier explique que le flux de chaleur est l'opposé du produit de la conductivité thermique des roches par le gradient de température. Son expression est donc :

$$q = - k \frac{dT}{dz}$$

Pour connaître le flux de chaleur en un point de la surface de la Terre il faut donc déterminer à la fois le gradient de température et la conductivité thermique des roches sous-jacentes. Comme nous l'avons vu précédemment, le gradient de température est obtenu par la mesure directe de la température à différentes profondeurs dans des forages ou dans des puits de mines. Pour connaître la conductivité thermique des roches, on les échantillonne dans les puits et on effectue des mesures en laboratoire. Dans une roche homogène (de conductivité thermique constante), le gradient de température, est vertical à la surface terrestre. En l'absence de circulation d'eau, le flux de chaleur est donc également vertical.

En milieu continental, la conductivité thermique des roches k vaut environ $2,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Elle varie en fait entre $2,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les basaltes et $3,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les péridotites. A titre de comparaison, la conductivité thermique des métaux est environ $420 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (cas de l'argent), et celle de l'eau est environ $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Les roches sont donc plutôt de « mauvais » conducteurs thermiques, même si leur conductivité thermique est supérieure à celle du bois ($\sim 0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Dans le cas présenté en figure 2, la température augmente de $80^\circ\text{C}/\text{km}$. Si on considère que la conductivité est $2,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ on obtient un flux de chaleur en surface de :

$$q = - 2,5 \cdot \frac{80}{1000} = 0,2 \text{ W/m}^2$$

Remarque

l'intégration de la loi de Fourier permet d'exprimer directement la température en fonction de la profondeur, connaissant la conductivité thermique des roches, le flux de chaleur, et la température en surface et en faisant l'hypothèse que le milieu ne comprend pas de source ou de puits de chaleur. Cette expression est :

$$T(z) = - \left(\frac{q_0}{k} \right) z + T_0$$

Avec :

- q_0 : flux de chaleur en surface
- k : conductivité thermique des roches
- T_0 : température en surface

IV.3. Carte mondiale du gradient géothermique et du flux de chaleur à la surface du globe

Le flux de chaleur a été déterminé à partir de plus de 24 000 données de terrain aussi bien sur croûte continentale qu'océanique sur tous les sites présentés sur la figure 8.

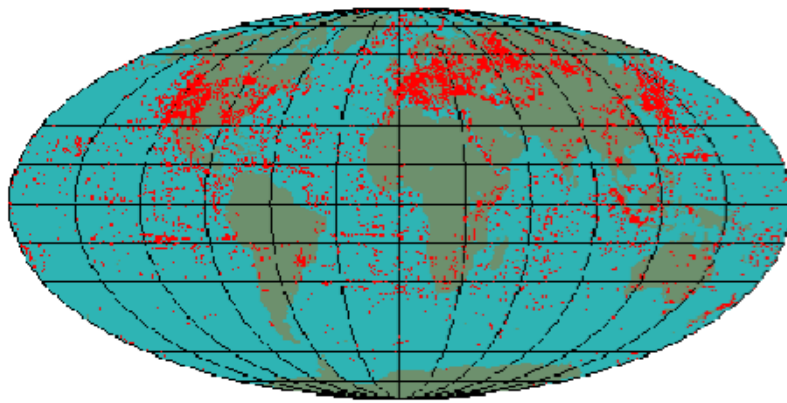


Figure 8. Les quelques 24000 sites de mesure du flux de chaleur
(Geological Sciences, University of Michigan)

En complétant par des estimations dans les zones non étudiées, une carte mondiale a été proposée (figure 9).

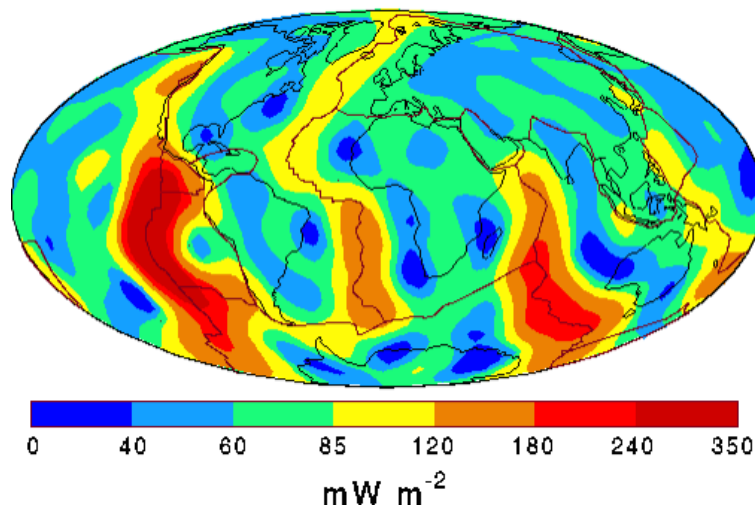


Figure 9. Carte mondiale du flux de chaleur

(<http://geophysics.ou.edu/geomechanics/notes/heatflow/q12.gif>)

Cette carte est riche en informations : tout d'abord, l'échelle de variations du flux de chaleur est très grande, allant de zone ayant un flux de $\sim 20 \text{ mW.m}^{-2}$ à des zones ayant un flux de l'ordre de 350 mW.m^{-2} . Le flux de chaleur moyen est de l'ordre de 87 mW.m^{-2} , mais il est différent sur les continents ($\sim 65 \text{ mW.m}^{-2}$) et sur les océans ($\sim 100 \text{ mW.m}^{-2}$).

Il existe une association claire des zones à flux de chaleur élevé avec les dorsales océaniques, et le flux de chaleur diminue ensuite de part et d'autre des dorsales depuis des valeurs pouvant atteindre 400 mW.m^{-2} jusqu'à des valeurs de l'ordre de 40 mW.m^{-2} . Cette évolution traduit la présence de matériel chaud (l'asthénosphère) très près de la surface au niveau des dorsales, et de plus en plus profond au fur et à mesure que l'on s'éloigne des dorsales.

La zone à fort flux de chaleur est assez étroite dans l'océan Atlantique en comparaison de la zone à fort flux de chaleur dans l'océan Pacifique. Cette différence est à mettre en relation avec la différence de vitesse d'expansion des dorsales océaniques atlantique (dorsale lente) et pacifique (dorsale rapide).

Le flux de chaleur est élevé au niveau des arcs volcaniques tandis qu'il est faible au niveau des fosses associées à la subduction à cause de l'enfoncement de matériel froid.

L'intégration de toutes les données de flux de chaleur à la surface de la Terre (figure 9), permet de quantifier l'énergie totale que représente le flux de chaleur. On estime cette valeur à environ 42 térawatts (TW). L'énergie libérée par le flux de chaleur est ainsi largement supérieure à celle libérée par l'ensemble de l'activité volcanique (~ 0,8 TW) ou celle libérée par l'ensemble de l'activité sismique (~1 TW), mais elle est largement inférieure à l'énergie solaire que nous recevons (~ 4710000 TW)

Enfin, notons que ce flux de chaleur traduit un gradient thermique qui doit nécessairement diminuer en profondeur. Si l'augmentation de température était constante est équivalente à celle enregistrée dans la figure 7 (80°C/km), la température au centre de la Terre serait de 500000°C. Cette valeur est évidemment immense et fautive. Les géophysiciens estiment en fait que la température ne doit pas excéder 6000°C au centre de la Terre.

V. Comprendre et modéliser les transferts de chaleur pour déterminer l'origine de la chaleur interne du globe

V.1. Les processus physiques d'échange de chaleur

Trois processus physiques permettent l'échange de chaleur :

V.1.1. Le rayonnement

La chaleur émise dépend (pour les corps noirs) de la température du corps exposant quatre, selon la loi de Boltzmann :

$$W = \sigma \cdot T^4$$

σ : constante de Boltzmann.

Ce processus d'échange de chaleur n'agit que dans les milieux laissant passer la lumière, ce qui n'est pas le cas des enveloppes silicatées de la Terre.

V.1.2. La convection

C'est un processus d'échange de chaleur par déplacement de matière sous l'effet d'un changement de masse volumique d'origine thermique. Ces déplacements ne sont possibles que si la dilatation thermique du milieu est élevée, le gradient de température est fort, et la viscosité et la diffusivité thermique du milieu sont limitées. Ainsi, pour qu'une convection puisse être mise en place, on admet généralement qu'il est nécessaire que leur nombre de Rayleigh soit supérieur à 2000.

Ce nombre sans dimension s'écrit avec :

- α : coefficient de dilatation thermique
- ΔT : différence de température
- g : gravité
- d : dimension caractéristique du système
- ν : viscosité cinématique
- K : diffusivité thermique

Transfert par conduction, pas de déplacement de matière

V.1.3. La conduction

C'est un processus de diffusion où les molécules transmettent leur énergie cinétique (vibrations) à d'autres molécules par collision entre elles. La chaleur est conduite dans un milieu en réponse à une variation spatiale de la température. La relation de base qui décrit le transport de chaleur par conduction est la loi de Fourier décrite précédemment. Ce processus agit indépendamment de la viscosité du milieu ou de sa transparence.

Les géophysiciens s'accordent sur le fait qu'à l'exception des transferts hydrothermaux de fluides, l'essentiel des transferts de chaleur dans la lithosphère ont lieu par conduction. Dans l'asthénosphère et dans le noyau externe, les nombres de Rayleigh élevés font penser que la convection est le mécanisme dominant.

V.2. Déterminer la température dans les profondeurs du globe

Pour contraindre l'évolution de la température à l'intérieur du globe, les géophysiciens utilisent des données sismologiques qu'ils comparent avec des données de pétrologie expérimentale. Il est alors possible de localiser les profondeurs des principaux changements de phases minéralogiques, et comme il est assez facile d'estimer la pression qui s'exerce à une profondeur donnée, la température exacte peut être déterminée. L'allure de l'évolution de la température dans le globe est donnée par la figure 10.

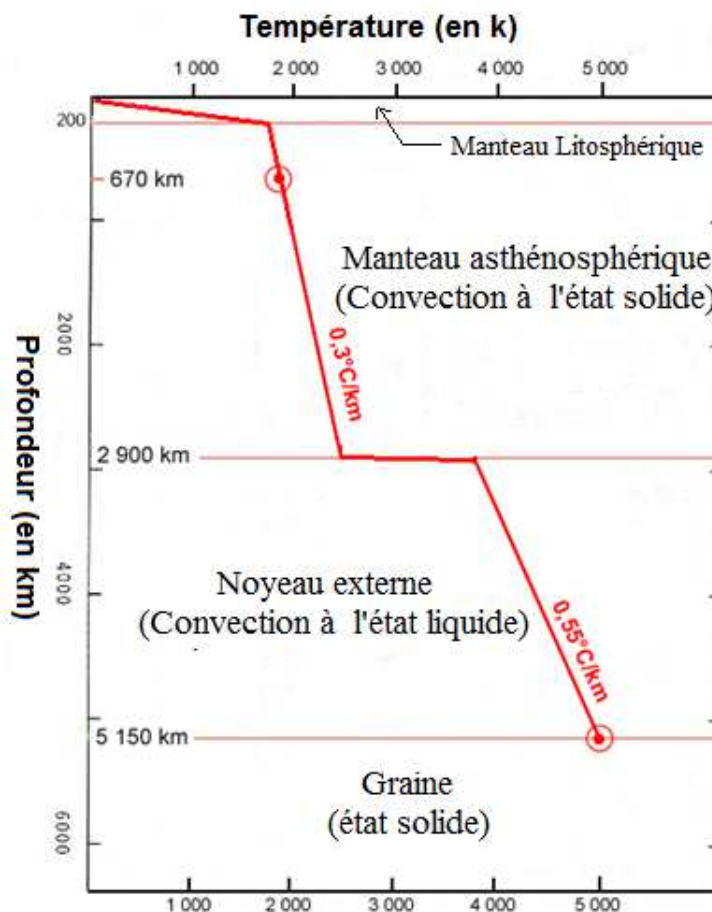


Figure 10. Évolution de la température et du gradient géothermique en fonction de la profondeur (<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/>)

Cette courbe présente deux types de pentes liés aux mécanismes de transfert de chaleur : la lithosphère et la couche D ont de fort gradient thermique liés à un processus de diffusion. Le

manteau asthénosphérique et le noyau externe ont des gradients plus faibles. Ils sont « brassés » et leur température et en quelque sorte homogénéisée par des mécanismes convectifs.

V.3. L'origine de l'énergie thermique interne

L'énergie thermique à l'origine du gradient et donc du flux provient de la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches (du manteau essentiellement) thorium, potassium et uranium (figure 11). Il s'agit d'une ressource énergétique inépuisable à l'échelle humaine.

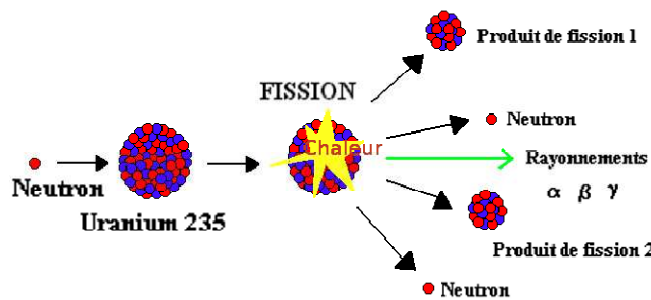
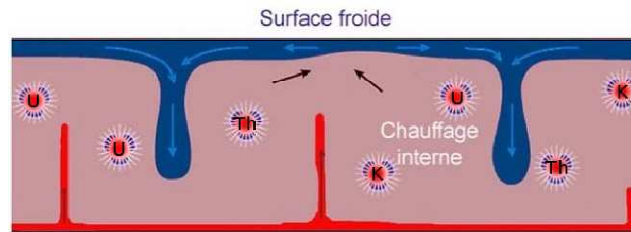


Figure 11. Processus de désintégration de l'Uranium 235 contenu dans les roches

V.4. Transfert de chaleur à l'intérieur du globe

Le transfert par convection est beaucoup plus efficace (donc rapide). Lorsque du magma ou l'asthénosphère sont proches de la surface, la convection dans le magma ou l'asthénosphère va apporter rapidement de grandes quantités d'énergie. Cela se traduit en surface par un flux géothermique localement plus élevé que la moyenne.

À l'échelle globale, le flux fort dans les dorsales est associé à la production de lithosphère nouvelle; au contraire, les zones de subduction présentent un flux faible associé au plongement de la lithosphère âgée devenue dense.

Dans les zones de subduction, le flux est certes faible à la verticale de la zone de plongement de la plaque lithosphérique, mais il est fort dans l'arc volcanique associé. C'est d'ailleurs là que sont implantées la plupart des grandes installations industrielles géothermiques, représentant 70% de l'énergie géothermique actuellement exploitée (voir les figures 12 & 13).

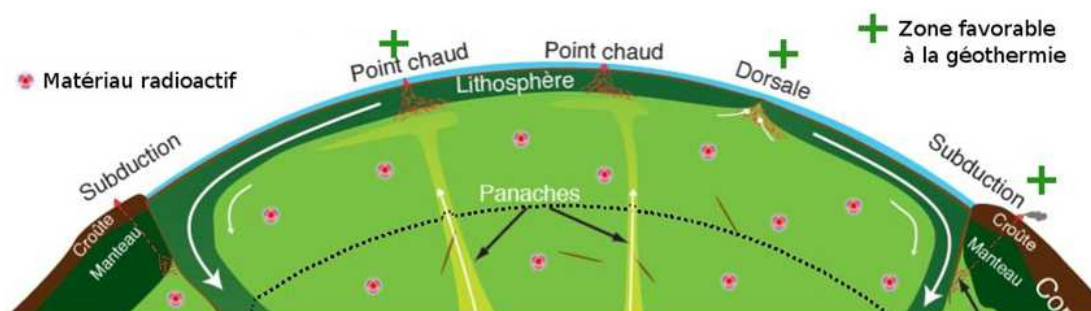


Figure 12. Transfert de chaleur à l'intérieur du globe terrestre (Source : Stéphane Labrosse & Pierre Thomas ENS Lyon)

Remarque : La subduction est le processus par lequel une plaque tectonique océanique s'incurve et plonge sous une autre plaque avant de s'enfoncer dans le manteau.

Notre planète est constituée de quatre couches internes concentriques :

- au centre, le noyau solide, situé à 6 370 km en-dessous de la surface, abrite des températures qui s'élèvent jusqu'à 4 200 °C ;
- autour du noyau solide, le noyau liquide avoisine les 3 500 °C et se situe à 5 200 km sous nos pieds ;
- le manteau constitue la troisième couche, à 2 900 km sous le sol, à une température de 3 000 °C ;
- la croûte terrestre constitue la couche extérieure à 1 000 °C et se situe à 30-60 km de profondeur.
- La géothermie permet de valoriser cet exceptionnel gisement de chaleur renouvelable.

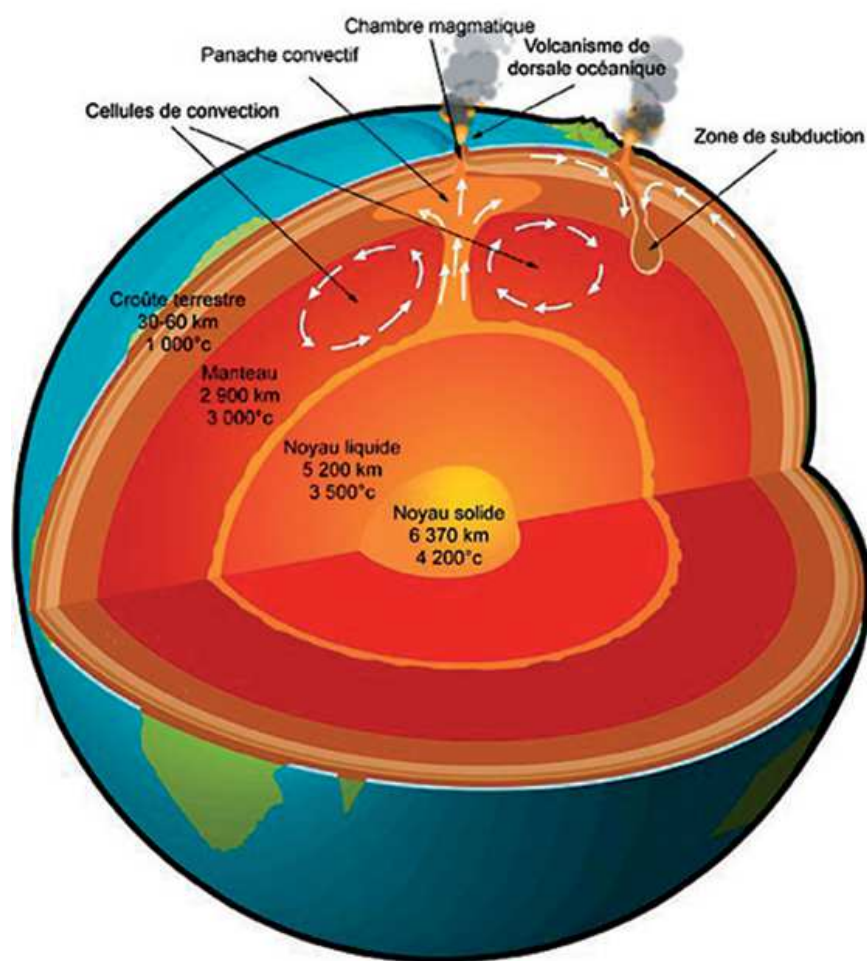


Figure 13. La chaleur de la Terre
(www.geothermie-perspectives.fr)

VI. La géothermie en Europe et dans le monde

En tout point de la planète, il est possible de capter et de transformer la chaleur emmagasinée dans les couches superficielles du sous-sol pour le chauffage des habitations. Les formes industrielles de la géothermie (basse, moyenne et haute énergie) nécessitent des contextes géologiques particuliers : bassins sédimentaires, volcanisme récent, bassins d'effondrement, etc.

VI.1. La situation en Europe

En 2011, on estimait la puissance électrique installée de l'ensemble des pays de l'Union Européenne à environ 1672 MW. La puissance thermique s'élevait quant à elle à environ 4700 MWh pour l'utilisation directe de la chaleur (hors PAC géothermiques).

Le marché annuel des PAC (Pompe A Chaleur) géothermiques dans les pays de l'Union européenne était estimé à 103846 unités vendues en 2010. Le parc installé s'élevait à plus d'un million de PAC géothermiques en fonctionnement (voir les figures 14, 15 & 16).

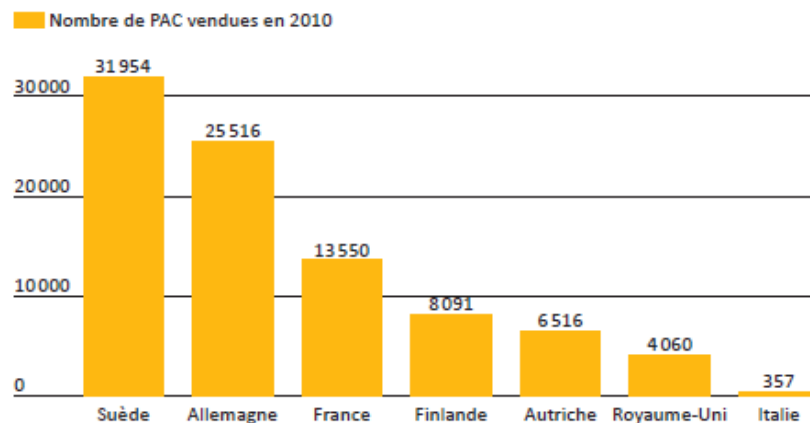


Figure 14. Marche des Pompes à chaleur géothermiques dans les pays européens en 2010
(Source : EurObserv'ER)

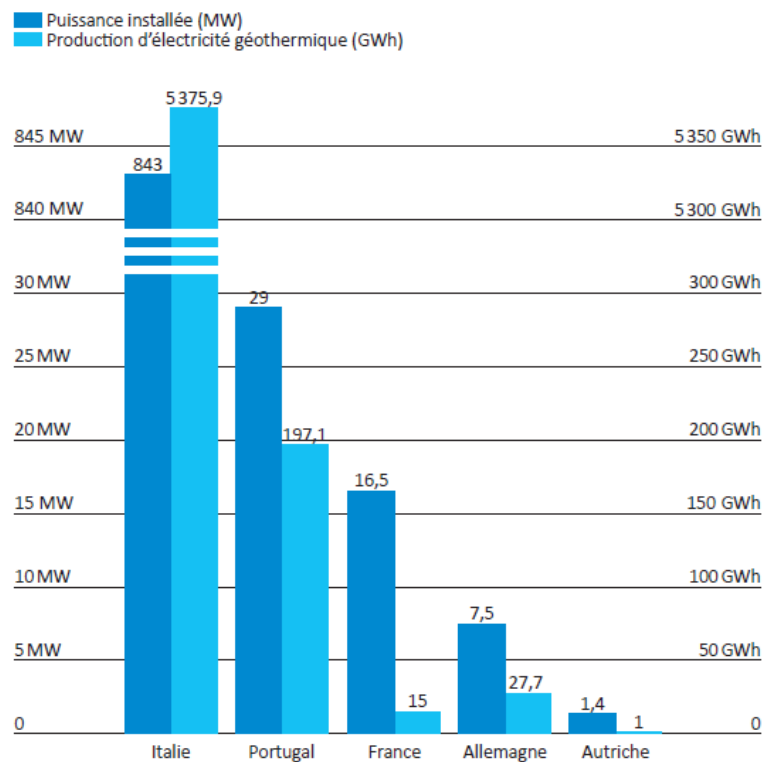


Figure 15. Production d'électricité géothermique haute énergie en 2011
(Source : EurObserv'ER)

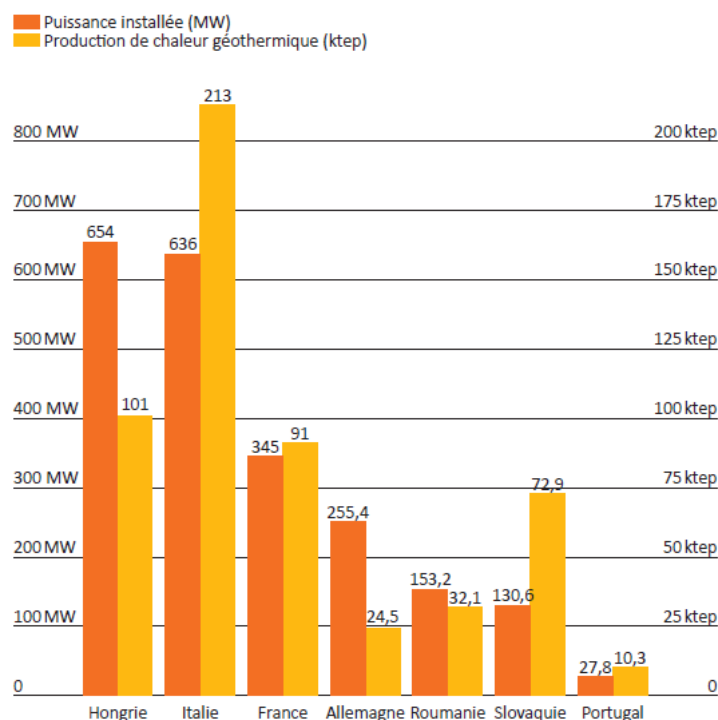


Figure 16. Production de chaleur directe géothermique (basse et moyenne énergie) en 2011 (Source : EurObserv'ER)

VI.2. La situation dans le monde (production d'électricité dans le monde)

On dénombre aujourd'hui plus de 350 installations géothermiques haute énergie dans le monde. La puissance totale de ces centrales électriques est d'environ 10700 MW en 2010 (contre 8000 MW en 2000), soit 0,3 % de la puissance mondiale électrique installée sur la planète.

En nombre de MWh produits, la géothermie constitue, avec l'hydroélectricité, la biomasse et l'éolien, l'une des quatre principales sources d'électricité renouvelable dans le monde.

Elle couvre 0,4 % des besoins mondiaux en électricité. Sa contribution aux besoins nationaux peut être bien plus élevée dans certains pays, et atteindre plusieurs pourcents.

Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique : six sur le continent américain pour plus de 4550 MW, cinq en Asie pour plus de 3800 MW, deux en Océanie pour 630 MW. L'Europe compte six pays producteurs (Islande, Italie, Allemagne, Danemark, France, Suède) pour une puissance de 1470 MW, et l'Afrique en compte deux pour 174 MW (figure 17).

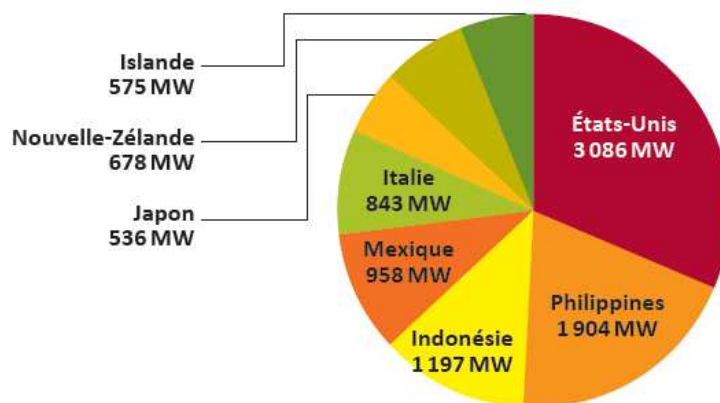


Figure 17. Capacités de production électrique installées des principaux pays en 2010 (Source : International Geothermal Association)

Fin 2009, plus de 70 pays utilisaient la géothermie pour produire de la chaleur (figure 18). La puissance installée était alors estimée à 50,6 GW, ce qui correspond à une production annuelle supérieure à 120000 GWh. Les principaux pays producteurs sont le Japon, la Chine, la Russie, les pays d'Europe de l'est, centrale et orientale, et les États-Unis. La France a joué un rôle de pionnier dans le développement de la géothermie basse énergie, en particulier dans le Bassin parisien qui présente la plus grande densité au monde d'opérations de géothermie en fonctionnement, grâce à une bonne adéquation entre les ressources géothermales et les besoins en surface (réseaux de chaleur).

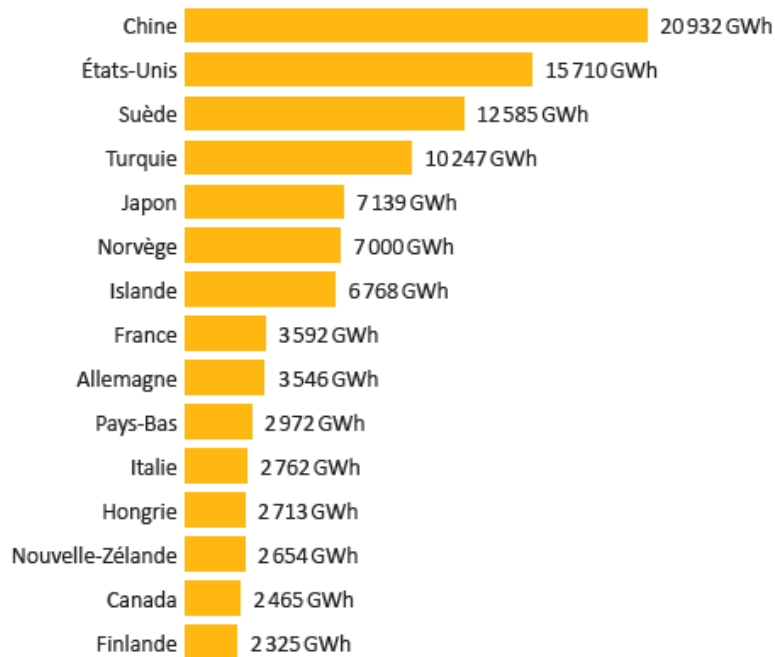


Figure 18. Production de chaleur géothermique des 15 principaux pays en 2009
(Source : AIE)

source : BRGM

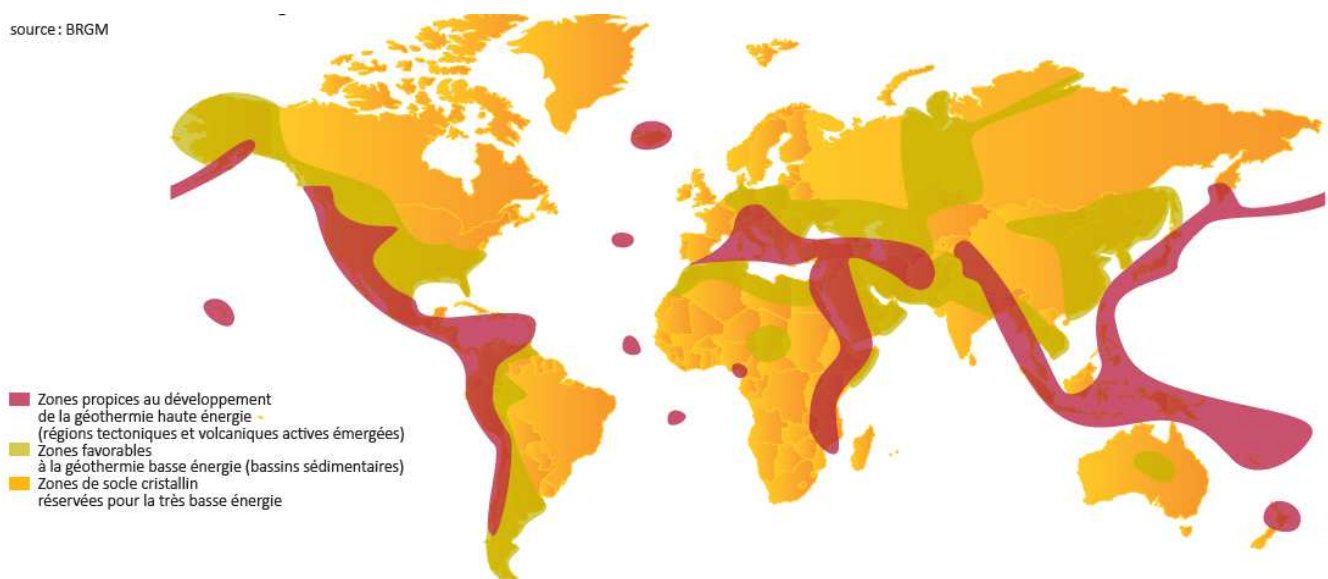


Figure 19. Les ressources mondiales de géothermie
(Source : BRGM)

VI.3. Aperçu sur la géothermie en Algérie

La région d'étude est située dans le Sahara algérien (figure 20). Les forages pétroliers et hydrauliques qui traversent le territoire saharien indiquent bien que dans certaines régions, les eaux sont très chaudes, ces constatations nous permettent de considérer le Sahara algérien comme favorable à la production de l'énergie géothermique.

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales.

Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-Est (Tableau 1). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskhoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois.

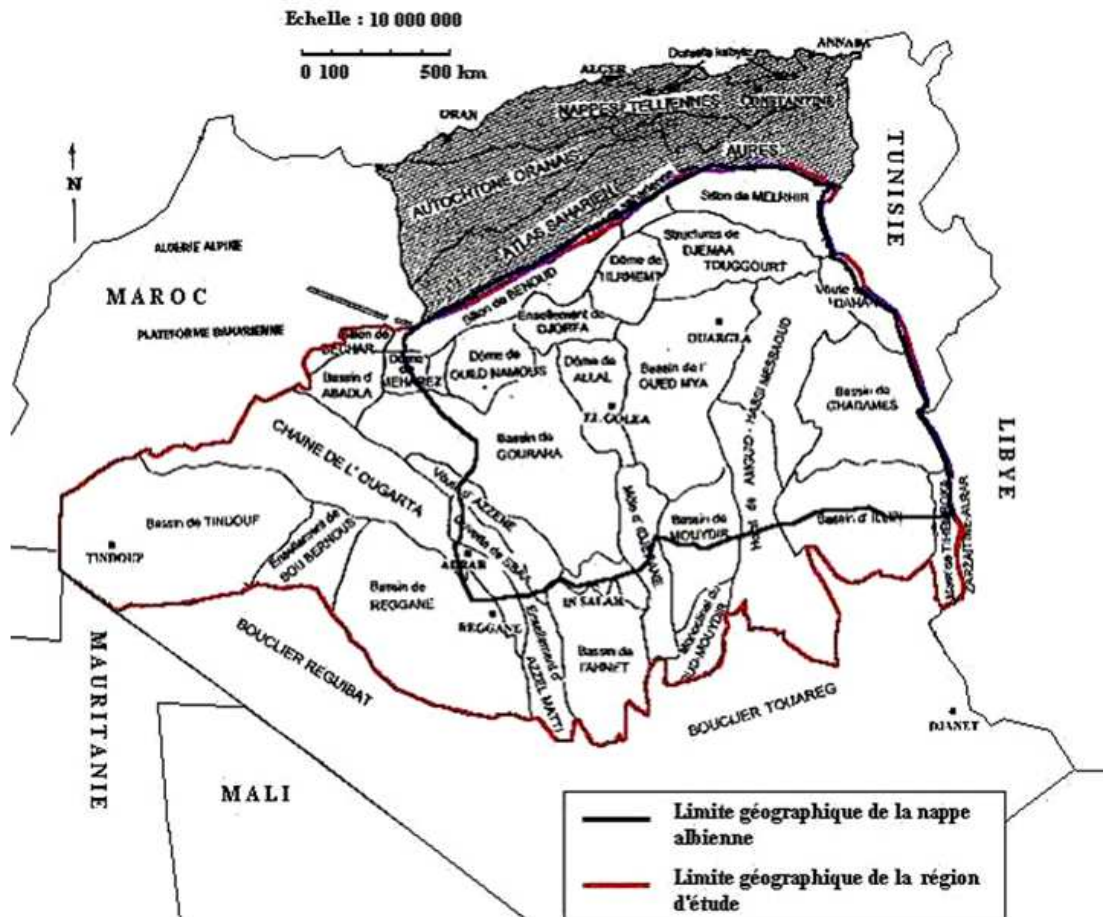


Figure 20. Situation géographique de la région d'étude
(S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en Géophysique, Université de Boumerdès, Mars 2006.)

Tableau 1: Caractéristiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (litre/seconde)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H. Bou Hadjar	Ain Témouchent	Chloruré sodique	3210	66,5	-
H. Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
H. Boutaleb	Sétif	Chloruré sodique	3416	52	-
H. Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H. Sidi Bou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saïda	Chloruré sodique	1524	47	-
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional, une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire (figure 21).

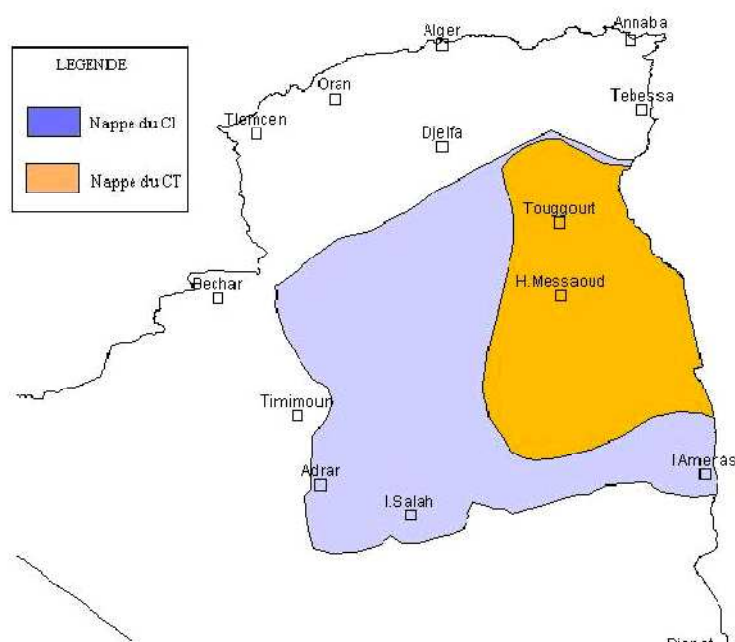


Figure 21. Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal

En Algérie, de nombreux forages pétroliers couvrent le Sahara algérien d'Est en Ouest, la majorité de ces forages sont localisés principalement dans la partie septentrionale du Sahara algérien, car cette région saharienne est par contre l'une des plus intéressantes du point de vue ressources fossiles (pétrole et gaz). Le Sahara algérien présente dans son ensemble un gradient géothermique moyen de l'ordre de 4 °C/100 m.

Dans la partie septentrionale du Sahara, le gradient géothermique est de l'ordre de 3 °C / 100 m. Il est moyen, et il pourrait être dû uniquement à l'effet de la profondeur.

Une forte anomalie géothermique est bien mise en évidence dans la partie occidentale du Sahara dans les régions de Béchar, Beni Abbès et Timimoun. Les diagraphies de forages consultés montrent que cette zone est anormalement chaude, plus particulièrement au niveau du forage HBZ - 1 situé dans la région de Beni Abbès où le gradient atteint plus de 6 °C / 100 m.

Ce gradient, qui est plutôt élevé, est probablement dû à la tectonique intense qu'a connue la partie occidentale de la plate forme saharienne au cours de l'orogénèse hercynienne.

Du point de vue pétrolier, la prospection pétrolière révèle que la province occidentale du Sahara algérien est pauvre en hydrocarbure liquide et ce, malgré que la condition majeure de son l'existence soit réunie en profondeur (la roche mère). Par contre la province orientale est très riche sur ce plan.

Sachant que le pétrole atteint le degré de maturité dans des conditions de température et de pression bien définies, au delà il perd sa maturité, soit il passe à la phase gazeuse, ou bien, dans des conditions extrêmes, il brûle carrément, on parle alors de « pétrole cramé ».

Donc le gradient géothermique élevé dans le Sahara occidental pourrait être l'un des facteurs responsables de cette pauvreté en hydrocarbures liquide dans cette région. Les résultats obtenus à partir de la carte géothermique seraient en concordance avec les résultats de la prospection pétrolière.

VII. Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures

Tableau 2. Principales utilisations de la géothermie en fonction de température

Type de Géométrie	Température en °C	Domaines d'utilisation	
Haute énergie	200 et plus		Production d'électricité par la méthode conventionnelle
	190	Réfrigération par absorption	
	180	Préparation de pâte à papier	
	170	Fabrication d'eau lourde	
	160	Séchage de poisson et de bois	
	150	Fabrication d'alumine	
Moyenne énergie	140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
	130	Évaporation	
	120	Production d'eau douce par distillation	
	110	Séchage de parpaings de ciment	
	100	Séchage de légumes	
	90	déshydratation	
Basse énergie	80	Chauffage urbain-chauffage de serres	
	70	Réfrigération	
	60	Élevage d'animaux	
	50	Balnéothérapie	
	40	Chauffage de sols	
Très basse énergie	30	Piscine, fermentation	
	20	Pisciculture	

VIII. Les avantages et les inconvénients de la Géothermie

Cette source d'énergie offre de nombreux avantages énergétiques et économiques.

- Tout d'abord économique puisque le rapport énergétique est très largement en faveur de l'utilisateur pour le chauffage ou la climatisation du logement.
- Aucune zone de stockage n'est à prévoir puisque l'énergie utilisée est simplement présente dans le sol.
- Le fonctionnement, le réglage et l'entretien de l'installation sont simples
- Le système est malléable. Il offre à l'utilisateur le choix de la diffusion d'énergie : radiateurs, sol chauffant...
- Évidemment, la géothermie a un aspect écologique incontestable étant donnée la disponibilité de la ressource dans tous les sous-sols de la terre et la quasi-absence d'émission de déchets tels que le CO₂, principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique.
- Dernier aspect positif, et non négligeable, les avantages fiscaux. L'état favorise l'utilisation des énergies renouvelables en accordant des crédits d'impôt aux particuliers.

Cependant, il existe également des inconvénients qu'il ne faut pas négliger lors du choix de la géothermie pour votre habitat.

- Si elle est économique à l'utilisation, la mise en place et les coûts liés à l'appareillage sont élevés.
- Pour un captage vertical, le principal désavantage est le prix du forage, pour un captage horizontal, il faut une superficie de terrain suffisamment grande pour la mise en place des capteurs
- L'exploitation de la géothermie est limitée au chauffage et climatisation