

## Flux et gradient géothermiques

Le flux géothermique est le flux d'énergie thermique dégagé par la surface terrestre en provenance de l'intérieur du globe.

Il dépasse les  $100 \text{ mW.m}^{-2}$  au niveau des dorsales ou des points chauds alors qu'il ne dépasse pas les  $40 \text{ mW.m}^{-2}$  à la verticale des fosses océaniques : le flux important mesuré au niveau des dorsales est associé au magmatisme accompagnant la production de lithosphère nouvelle alors que le flux faible mesuré au niveau des zones de subduction est associé au plongement d'une lithosphère refroidie devenue dense.

Les mesures du flux géothermique pratiquées sur l'ensemble des continents et des océans révèlent une puissance totale d'environ  $43.10^{12} \text{ W}$  pour une valeur moyenne de  $50 \text{ mW.m}^{-2}$ .

Le gradient géothermique correspond au profil terrestre de température en fonction de la profondeur.

Des mesures de température dans les mines et les forages permettent de connaître le gradient géothermique moyen dans les premiers kilomètres de la lithosphère : supérieur à  $30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$  au niveau des dorsales, il descend à  $10 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$  au niveau des zones de subduction.

Au-delà de 12 km, il est possible d'approcher la mesure du gradient géothermique grâce à des données géologiques indirectes :

- au sommet de l'asthénosphère, le ralentissement de la vitesse des ondes sismiques ( *Low Velocity Zone ou LVZ* ) révèle des conditions de température et de pression voisines de celles nécessaires à la fusion de la péridotite mantellique ce qui suppose une température proche de  $1\ 600 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- la brusque variation des ondes sismiques vers 670 km de profondeur correspond à des transitions minéralogiques qui nécessitent une température proche de  $1\ 900 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- on sait grâce aux ondes sismiques que le noyau externe est liquide alors que le noyau interne est solide ; l'analyse expérimentale du fer, composant essentiel du noyau, indique que la température du noyau externe est proche de  $3\ 800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ainsi, on peut déduire que le gradient géothermique est fort (  $10$  à  $30 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$  ) jusqu'à l'asthénosphère puis devient faible (  $0,4 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$  ) jusqu'à la limite manteau/noyau.

## L'énergie géothermique, une énergie exploitable par l'Homme

L'énergie géothermique est la deuxième source de production d'électricité dans le monde, mais c'est aussi une ressource utilisée pour le chauffage urbain, des serres agricoles et de la pisciculture : toutefois, si cette source d'énergie est considérée comme inépuisable, le débit de cette énergie reste généralement très faible.

Dans les régions géologiquement calmes ( en dehors des limites de plaques et des points chauds ), le gradient géothermique est stable d'une région à l'autre ( en moyenne  $0,3 \text{ K.km}^{-1}$  ) bien que l'on puisse observer des variations significatives (  $0,2 \text{ K.km}^{-1}$  au pied des Pyrénées à  $1 \text{ K.km}^{-1}$  au nord de l'Alsace ).

Dans les régions géologiquement actives ( au niveau des frontières de plaques et des points chauds ), les valeurs du flux et du gradient géothermiques sont plus élevées : le gradient géothermique maximal est de  $5 \text{ K.km}^{-1}$  alors que le flux géothermique peut atteindre des valeurs de  $0,5$  à  $1 \text{ W.m}^{-2}$ .

La géothermie de basse et très basse énergie exploite les nappes phréatiques de faible profondeur dont la température n'excède pas  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  : elle peut être utilisée pour chauffer des locaux à l'aide de pompes à chaleur et ses débouchés pour l'habitat individuel sont importants. Ces gisements de basse et très basse énergie sont largement répandus à la surface du globe terrestre : c'est ce type de gisements que l'on trouve majoritairement en France comme dans le Bassin parisien ou aquitain.

La géothermie de moyenne et haute énergie se développe dans les régions à magmatisme récent ou actuel :

- la géothermie de moyenne énergie explore en général des gisements d'eau chaude ou de vapeur humide dont la température est comprise entre  $90$  et  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  : dans certaines zones, ces températures s'observent à moins de  $1\ 000$  mètres de profondeur mais on trouve le plus souvent entre  $2\ 000$  et  $4\ 000$  mètres ; la géothermie de moyenne énergie est surtout utilisée par l'industrie ;
- la géothermie de haute énergie exploite des fluides dépassant les  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  et permet la production d'électricité par l'intermédiaire de turbines.

En France, ce type de ressources ne se rencontre que dans les DOM comme à Bouillante en Guadeloupe ou au Lamentin en Martinique.

Dans le monde, l'exploitation de la géothermie ne couvre que  $0,4 \%$  des besoins en électricité.

## L'origine de l'énergie interne du globe

Les minéraux des roches sont formés de divers éléments chimiques : parmi ces éléments, certains présentent des isotopes radioactifs instables qui se désintègrent au cours du temps en libérant de l'énergie.

Quelques isotopes seulement sont responsables de la majeure partie de la libération de chaleur associée à la radioactivité : l'uranium (  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  ), le thorium (  $^{232}\text{Th}$  ) ainsi que le potassium (  $^{40}\text{K}$  ).

Un tiers de la chaleur serait produite dans la croûte terrestre où la concentration en éléments radioactifs est la plus élevée alors que les deux tiers restants le seraient dans le manteau dont les concentrations en éléments radioactifs sont plus faibles mais dont le volume est nettement supérieur.

Une autre source d'énergie correspond à la chaleur initiale accumulée lors de l'accrétion planétaire : les multiples impacts des corps célestes qui se sont agrégés ont dégagé une énorme quantité d'énergie. Si les couches superficielles ont rapidement dissipé cette énergie, ce processus a été beaucoup plus lent pour le noyau et se poursuit encore actuellement. Cette source d'énergie reste secondaire et se limite à  $17.10^{12}$  W ( comparé à un total de  $43.10^{12}$  W ).

## Les mécanismes de transfert de l'énergie interne de la Terre

Il n'existe que trois mécanismes de transfert d'énergie thermique : la conduction, la convection et le rayonnement électromagnétique mais ce dernier ne peut traverser les roches terrestres.

Lors d'une conduction, les atomes des zones chaudes vibrent plus que les atomes des zones froides : ces vibrations se transmettent de proche en proche et le transfert d'énergie se fait sans mouvement macroscopique de matière. Ce mode de transfert étant peu efficace, le gradient thermique d'une conduction est important.

Lors d'une convection, la zone où la température augmente voit sa masse volumique diminuer et aura tendance à monter par rapport aux zones adjacentes plus froides : le transfert d'énergie se fait avec mouvement macroscopique de matière. Ce mode de transfert étant très efficace, le gradient thermique d'une convection est faible.

Le fort gradient géothermique jusqu'à l'asthénosphère (  $10$  à  $30$   $^{\circ}\text{C.km}^{-1}$  ) est donc le résultat d'une conduction alors que le faible gradient géothermique jusqu'à la limite manteau/noyau (  $0,4$   $^{\circ}\text{C.km}^{-1}$  ) est le résultat d'une convection.

La dynamique convective du manteau est très compliquée :

- les subductions représenteraient les seuls mouvements actifs : lorsque la lithosphère océanique est suffisamment refroidie, sa masse volumique (  $3,3$   $\text{g.cm}^{-3}$  ) dépasse celle de l'asthénosphère sous-jacente (  $3,25$   $\text{g.cm}^{-3}$  ) ce qui induit un plongement ;
- les dorsales seraient simplement des remontées passives ; une plaque lithosphérique est donc tirée par la subduction plutôt que poussée par la dorsale.

La tomographie sismique détecte des anomalies de vitesse de propagation des ondes sismiques : une augmentation de la vitesse correspond à une température plus basse par rapport à la moyenne à cette profondeur alors qu'une diminution de la vitesse correspond à une température plus haute par rapport à la moyenne à cette profondeur.

Les données recueillies par tomographie sismique indiquent, d'une part, que de la matière froide plonge au niveau des zones de subduction, quasiment jusqu'à l'interface du noyau et du manteau et, d'autre part, qu'il n'y a pas sous les dorsales d'anomalie thermique s'enracinant à une profondeur supérieure à 400 kilomètres. Ces données confirment le modèle : les subductions correspondent à des plongements profonds de la lithosphère qui mettent en mouvement des plaques alors qu'au niveau des dorsales, les remontées restent superficielles et viennent compenser l'écartement relatif dû au déplacement des plaques lithosphériques.

Par ailleurs, les points chauds seraient les traces en surface de panaches mantelliques actifs d'origine profonde.