



## SEMAINE 6 : GÉOTHERMIES

*Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Contexte et ressources géothermiques » de la semaine 6 du MOOC « Énergies renouvelables ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.*

### *L'origine de la chaleur exploitée en géothermie*

**Jean SCHMITTBUHL**

*Directeur de recherche – CNRS*

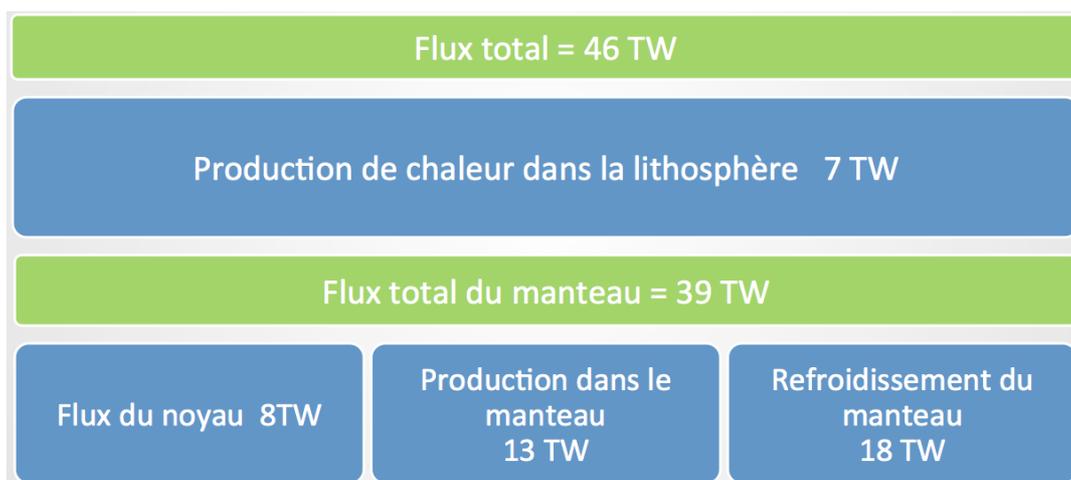
Alors, pour la géothermie profonde, une question assez primaire, première, c'est de savoir d'où vient cette chaleur qu'on cherche à exploiter. Et pour cela, on peut se poser la question à l'échelle du globe : quel est le flux de chaleur qui sort en permanence de la Terre sur tous les mètres carrés à la surface du globe ? Et voir comment se répartissent ces flux de chaleur, quel est son importance et on va essayer ensuite d'aller plus progressivement vers ce qui se passe en métropole pour voir comment se passe la situation en particulier en France.

- Alors, si on regarde la façon dont sort la chaleur du sol sur l'ensemble du globe, on peut voir sur cette figure qu'en permanence, quelques Watts, quelques fractions de Watts en fait sortent par mètre carré et que ce flux de chaleur, en fait il est tout petit et si on veut se faire une idée, typiquement, il est de l'ordre de 90 milliwatts par mètre carré donc si on prend 1 m<sup>2</sup> d'une surface, il n'y a même pas 1 Watt qui sort.

- Si on veut se faire une idée, c'est en regardant ce qui se passe, par exemple si on était capables de convertir toute cette énergie en électricité, la surface qu'il faudrait pour chauffer quelques ampoules et bien c'est plutôt du domaine d'un terrain de foot.
- ⇒ Donc c'est une petite chaleur qui existe et que l'on cherche à utiliser.
- Et puis, si on regarde de plus près, on voit bien sur cette figure que la distribution de l'émission de la chaleur en permanence elle n'est pas homogène.
- ⇒ Elle se distribue de façon différente entre les continents et les océans et en fait, sur les continents, elle est plus petite, elle est de l'ordre de 60 milliwatts par mètre carré, alors que sur les océans, elle est un peu plus forte.
- Donc, ça c'est le chiffre que l'on peut retenir : sur les continents, on est environ à 60 milliwatts, donc une petite fraction de Watts pour chaque mètre carré de la surface.
- Alors, ce chiffre de 90 milliwatts il faut le situer par rapport à d'autres choses et voir qu'en fait, si on est sur 1 m<sup>2</sup> à la surface du sol, en fait ces 90 milliwatts, c'est tout petit par rapport à ce qui va venir du Soleil.
- ⇒ Parce qu'on voit sur cette image, on a la distribution de la chaleur reçue par l'ensemble de la surface du globe et là, à chaque mètre carré, on va recevoir en moyenne 342 Watts, ce qui est 4000 fois supérieur à ce qui vient au fait du dessous, sous les pieds on a ce flux interne - 90 milliwatts - mais ce qu'on recevrait au niveau de la tête, ce serait plutôt ces 342 Watts.
- Donc on voit qu'exploiter la géothermie, c'est exploiter quand même une petite partie de l'énergie qui arrive à la surface de la Terre et un ordre de grandeur que l'on peut garder aussi, c'est en France, c'est plutôt de l'ordre de 150 Watts par mètre carré.
- ⇒ Et là on voit que déjà avec 1 m<sup>2</sup>, si on était capables de convertir cette énergie en électricité, on peut déjà allumer pas mal d'ampoules.
- ⇒ Donc on se rend bien compte que c'est deux grandeurs bien différentes.
- Alors, là vous avez un schéma qui résume un peu cette même information.
- ⇒ Sur la surface, sur 1 m<sup>2</sup> de surface au sol à la surface du globe, on est principalement sensibles à la chaleur qui vient du Soleil, ces 342 Watts par mètre carré et il y a une petite quantité qui vient du sol, qui est ces 90 milliwatts ou 0,09 Watts par mètre carré.
- ⇒ Donc cette petite fraction que l'on cherche à exploiter dans le cadre de la géothermie.
- Alors voilà quelques chiffres pour aussi positionner un peu cette énergie. Elle paraît toute petite, mais en fait, elle reste quand même la deuxième source de dissipation de l'énergie à la surface du globe.

	W (J/sec)	
Énergie Solaire	$1.7 \cdot 10^{17}$	99,97%
<b>Flux géothermique</b>	<b><math>4.6 \cdot 10^{13}</math></b>	<b>0.03%</b>
Dissipation des marées	$3 \cdot 10^{12}$	0.0018%
Énergie des volcans	$3 \cdot 10^{11}$	0.00018%
Énergie sismique	$3 \cdot 10^{10}$	0.000018%
<b>Production mondiale d'énergie</b>	<b><math>1.3 \cdot 10^{13}</math></b> (~9000 centrales nucléaires)	<b>0.0076%</b>
(1 centrale nucléaire: $\sim 1.5 \cdot 10^9$ W)		

- ⇒ On le voit là, c'est une petite fraction par rapport à l'énergie solaire, comme on l'a dit, mais ça reste quand même plus important que l'énergie qui est dissipée par les marées par exemple ou l'énergie dissipée par les volcans et c'est presque 100 fois l'ensemble de l'énergie qui est dissipée par les séismes à la surface du globe.
- Ce que l'on peut voir aussi, c'est que cette énergie, ce flux géothermique (donc  $4,6 \cdot 10^{13}$  Watts), c'est un ordre de grandeur qui est comparable à la production mondiale d'énergie et donc dans l'absolu, si tout était au mieux dans le meilleur des mondes, on devrait pouvoir assurer l'ensemble des besoins mondiaux par ce flux géothermique.
- ⇒ Alors, ce flux géothermique c'est ce qui se passe à la surface du globe, ces 46 TW (ou  $4,6 \cdot 10^{13}$  Watts que l'on vient de voir), sur le haut de la figure là, on voit, c'est ce qui sort en permanence sur la surface du globe.
- Alors d'où vient cette chaleur ?

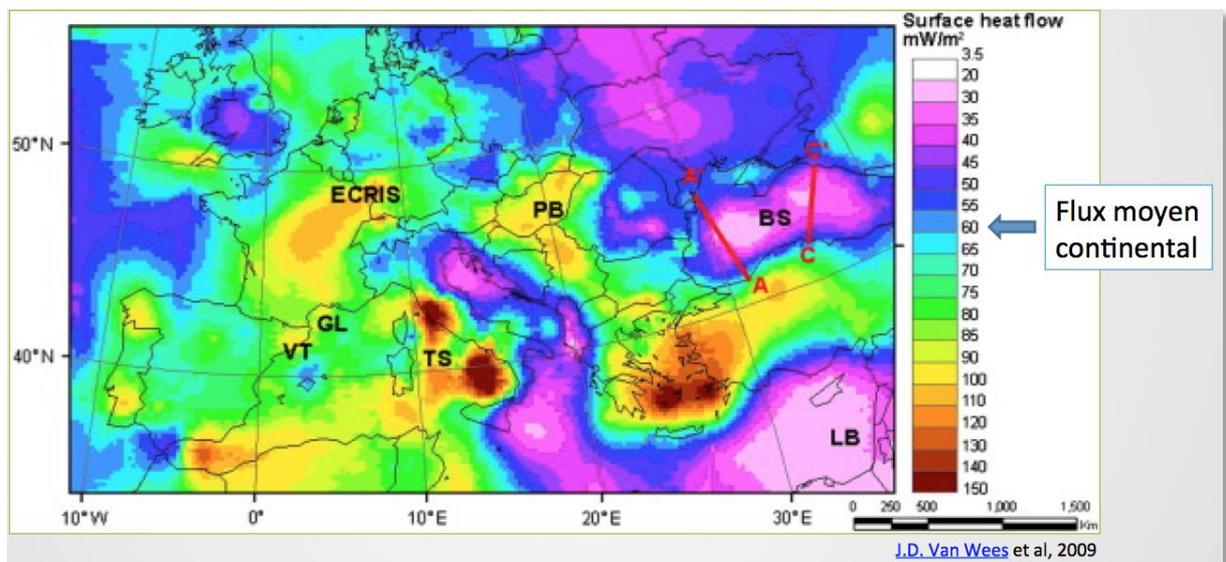


- Si on résume la situation en quelques chiffres clés, on voit que l'essentiel vient du manteau terrestre, donc en grande profondeur, avec une production au niveau du noyau, une production dans le manteau aussi et le refroidissement initial aussi qui contribue à

hauteur de 18 TW, mais un point qui n'est pas toujours bien connu, c'est qu'il y a quand même une partie non négligeable qui vient de la radioactivité qui est présente dans la partie supérieure de la Terre au niveau de la lithosphère.

⇒ Donc toute cette production s'échappe en permanence et forme ces 46 TW.

➤ Alors, cette chaleur, on l'a dit, elle sort en permanence autour du globe, elle est différente entre les océans et les continents mais même au niveau des continents, il y a des grandes variations géographiques et là, vous avez une carte de la distribution de ce flux de chaleur au niveau de l'Europe.



⇒ On voit en bleu qu'il y a les 60 milliwatts par mètre carré dont on a parlé qui sont le flux moyen continental.

⇒ Mais on voit par exemple qu'en France, il y a dans la partie Est de la France, une grande zone où on est sensiblement au-dessus de ce flux moyen, et puis il y a d'autres zones, comme en Italie, en mer Adriatique par exemple qui sont beaucoup plus froides, ou au sud de la Turquie, et on voit qu'il y a des contrastes importants avec des zones qui sont favorables à ce flux de chaleur et d'autres qui le sont beaucoup moins.

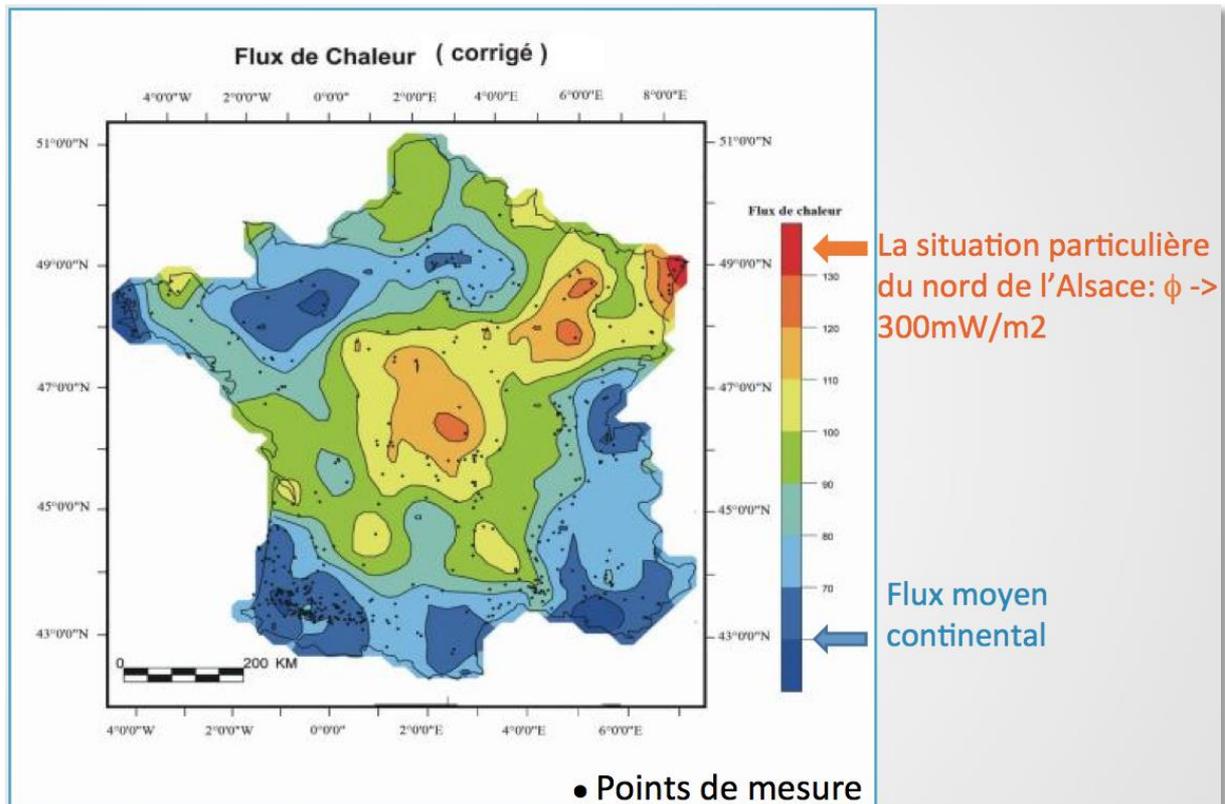
➤ Alors si on essaie de comprendre ça, on peut voir que c'est très lié à la géodynamique régionale et typiquement, la formation des Alpes contribue à cette distribution du flux de chaleur et également, par exemple, la subduction sur la mer Égée contribue à un potentiel énorme en Turquie, alors qu'au niveau de la mer Égée, le flux est beaucoup plus faible.

⇒ Donc il y a un lien fort entre géologie, géodynamique et distribution du flux de chaleur.

➤ Donc quand on zoome encore un peu plus cette analyse du flux de chaleur sur la métropole, la France métropolitaine, on voit qu'il y a cette distribution sur le centre et l'Est d'un flux élevé mais que la situation alsacienne est vraiment singulière avec un flux

de chaleur qui peut être très important, beaucoup plus important que le flux moyen continental de 60 milliwatts par mètre carré que l'on a discuté précédemment et il peut monter jusqu'à 300 milliwatts par mètre carré ce qui en fait une situation singulière.

- ⇒ Et donc on voit bien que l'exploitation de cette chaleur en particulier en profondeur est très dépendante du territoire et peut être beaucoup plus propice, par exemple en Alsace.
- ⇒ C'est effectivement dans ces régions-là que les grands projets, en particulier de Soultz-sous-Forêt, ont été développés.



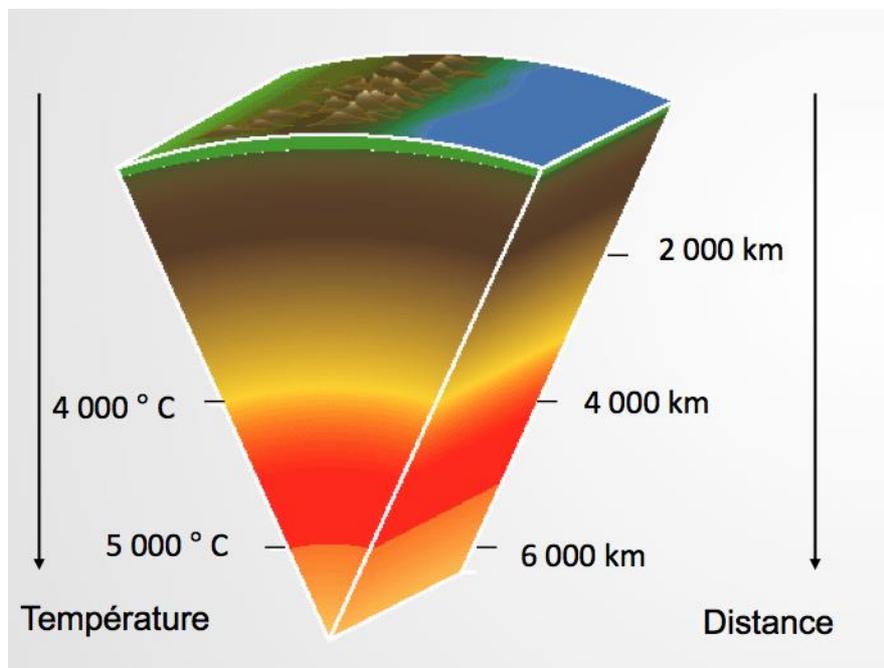
# Généralités sur la géothermie

**Sandrine PINCEMIN**

*Enseignante-Chercheuse – EPF Ecole d'ingénieurs-E-S*

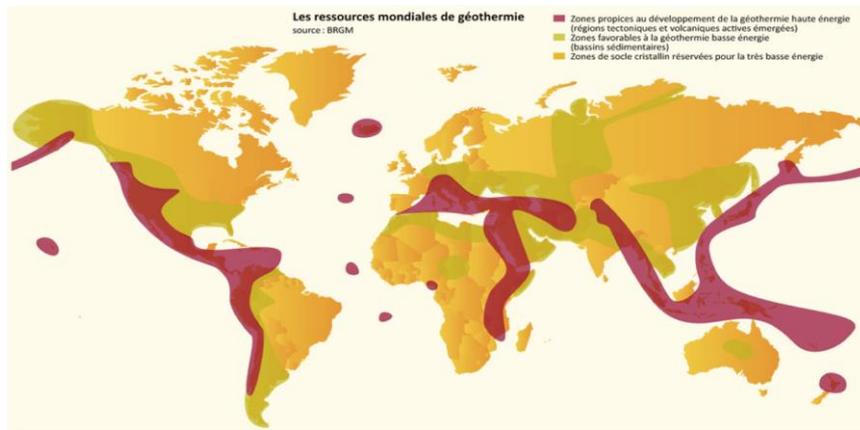
Aujourd'hui, je vais vous parler de la géothermie et principalement, je vais me focaliser sur la géothermie basse température.

- Tout d'abord, la géothermie, sa définition. La géothermie c'est l'exploitation de la chaleur du sous-sol.
- ⇒ Sur la coupe du globe terrestre présentée à gauche de ce slide, vous avez une répartition et un lien entre la distance, c'est-à-dire la profondeur du globe terrestre et la température.

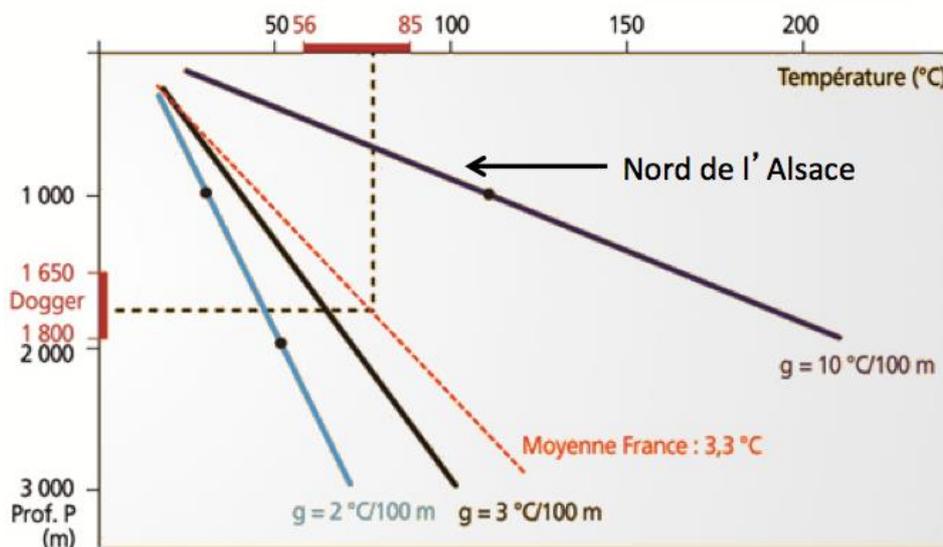


- ⇒ On observe que plus on descend profondément dans le globe terrestre et plus la température va augmenter.
- On va donc essayer de récupérer cette énergie et cet accroissement de température afin de produire soit de l'électricité, soit de la chaleur, soit du froid.
- Les applications génériques de la géothermie sont le stockage de l'énergie et, de manière générale, la géothermie nous permet une production d'électricité, de chaleur ou de froid de façon décarbonée.

Au niveau des ressources géothermiques présentes dans le monde, vous avez une répartition présentée sur la carte présentée sur le slide.



- Cette répartition nous montre qu'en fonction de l'endroit où l'on se trouve, on aura une géothermie qui pourra être à basse, moyenne et haute température.
- Aujourd'hui, nous cherchons plus à regarder des applications géothermie basse température et on constate, sur ce graphe, que les usages en basse température sont très importants (ce sont les couleurs les plus claires sur cette carte).
- Si on se focalise au niveau de la France, on constate de nouveau que l'utilisation de la géothermie basse température peut se faire de façon très importante.



- Si on regarde le graphe à droite où on a une répartition du gradient de température, c'est-à-dire une répartition, une évolution de la température en fonction de la profondeur du sol, on verra que ce gradient va être en moyenne de 3,3°C en France.
- ⇒ Cette valeur nous permet de dire que tous les kilomètres, on aura une variation de 10 à 40°C de la température du sol en France.
- ⇒ On cherchera donc à récupérer cette variation de température pour les applications qui nous intéressent.

La géothermie est une énergie renouvelable, cette énergie renouvelable fait partie de notre mix énergétique et si on regarde sur le tableau présenté sur ce slide, nous voyons l'évolution de ces ressources énergétiques au fur et à mesure des années.

- ⇒ On constate que l'année 2011 a été une année particulière puisque c'était une année où il y avait de fortes variations climatiques.
- ⇒ En 2012, nous avons réatteint le niveau des années précédentes.
- Ce qu'il est important de voir, c'est les variations et les variations au niveau de la production d'énergie primaire par ces filières énergies renouvelables.
- ⇒ On constate qu'il y a eu une augmentation d'environ 5,3 % depuis l'année 2005 (entre l'année 2005 et l'année 2012), l'année 2005 étant notre année de référence.
- Si on compare la géothermie avec les autres énergies renouvelables, on verra que la géothermie représente une faible part parmi notre mix énergétique et parmi nos énergies renouvelables.
- Cette énergie a pourtant un fort potentiel et dans les années à venir va tendre à se développer du fait de son potentiel d'un point de vue économique, de son potentiel environnemental puisque ça permet la production d'énergie décarbonée et du fait de sa simplicité d'usage.

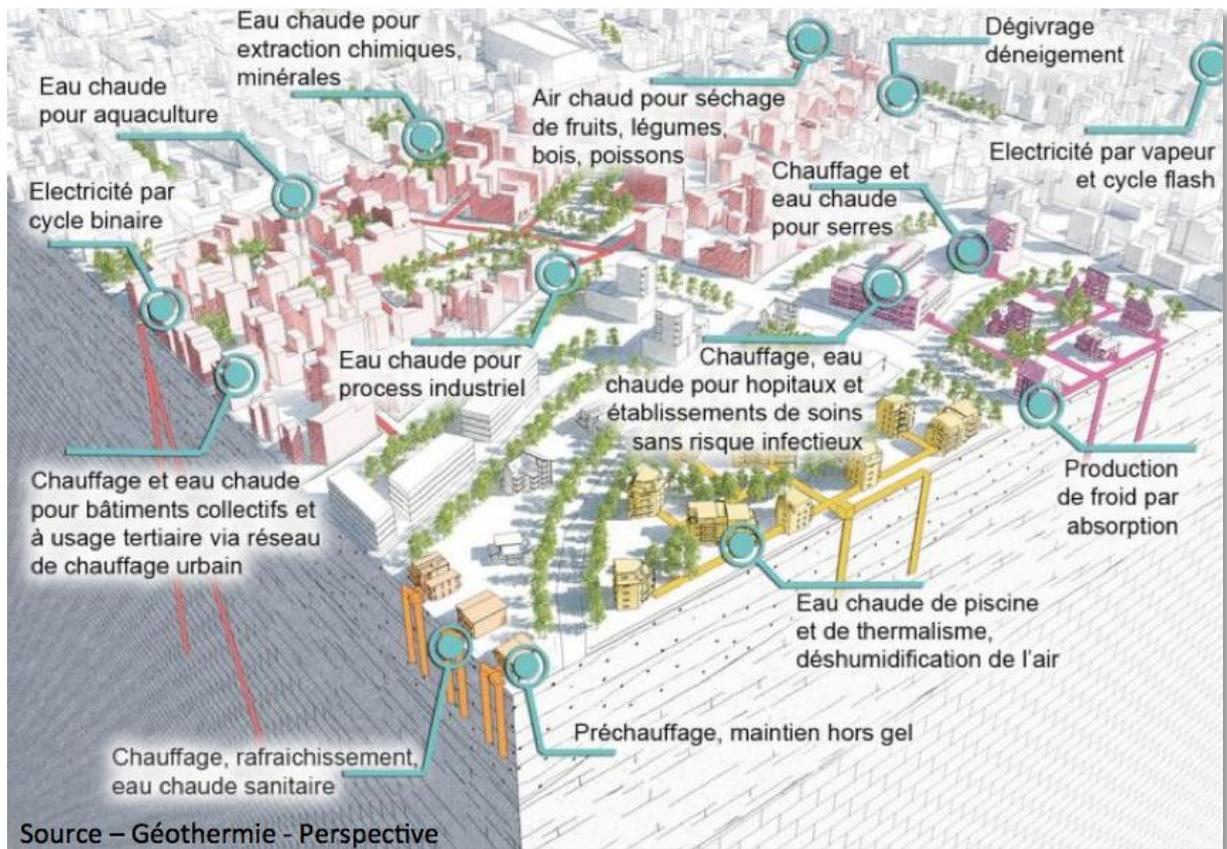
Les usages de la géothermie sont multiples. Tout d'abord un petit point historique avant de développer les différents usages que l'on peut avoir.

- Les premières applications datent d'avant Jésus-Christ, on a tout d'abord utilisé la géothermie au niveau des thermes dans les différents villages romains.
- Une première exploitation de la chaleur a pu être notée au XIV<sup>e</sup> siècle en France, dans le village de Chaudes-Aigues.
- ⇒ Dans ce village, on a pu avoir une répartition de la chaleur en utilisant un réseau de chaleur simpliste qui permettait la distribution d'eau chaude au niveau des différentes maisons.
- Il a fallu attendre les années 1800 pour avoir les premières applications industrielles.
- ⇒ Simpliste au départ où l'usage consistait à utiliser l'énergie géothermique pour la séparation de boues, elles sont devenues de plus en plus importantes dans les années suivantes.
- En 1930, on a pu avoir la première utilisation d'un chauffage urbain - ce chauffage urbain a été développé en Islande -, à partir de ce moment-là, la géothermie moyenne température a pu se développer un petit peu partout dans le monde.

- Il y a eu ensuite une stagnation et il faudra attendre les années 70 et les chocs pétroliers pour avoir de nouveau un développement de la géothermie.

Les usages géothermie basse température sont représentés - et les usages actuels -, sont représentés sur la figure présentée sur ce slide.

- Il y a environ quatre usages principaux de la géothermie basse température. Ces usages sont la production de chaleur et de froid, la production d'eau chaude sanitaire, le rafraîchissement par géocooling et le stockage de chaleur.
- Je vais détailler les trois applications principales : chaud, froid, ECS et géocooling, le stockage de chaleur étant dû au fait que le sol a une capacité à garder l'énergie qu'on lui a donnée à un certain moment.
- Pour la production de chaleur et de froid, c'est l'application la plus classique pour la géothermie basse température.
  - ⇒ Cette application est couplée à l'usage d'un système thermodynamique ou pompe à chaleur.
- En utilisant certaines catégories de pompes à chaleur géothermales, il sera possible de produire soit de la chaleur, soit du froid, soit de produire les deux de façon simultanée.
  - ⇒ Cette production se fait à l'échelle du bâtiment par exemple.
- Au niveau de l'eau chaude sanitaire, on va élever un petit peu le niveau de température et on va réussir à produire de l'eau à un niveau de température suffisant pour éviter tous les risques de contamination et tous les risques de pollution sanitaire.
- Enfin, l'usage de la géothermie pour le géocooling - et c'est ce qui correspond aux puits canadiens ou les puits provençaux -, cet usage va nous permettre de récupérer de l'air à l'extérieur, le faire passer dans des tuyaux qui sont présents dans le sol, la température stable du sol va nous permettre de stabiliser la température de l'air avant injection dans le bâtiment cible, cette injection se fait via une ventilation par exemple ou une ventilation double flux.
  - ⇒ L'objectif étant, pour des saisons données, de permettre de faire du rafraîchissement ou du chauffage de notre installation.



# Les différents types de géothermie et leur maturité

**Jean SCHMITTBUHL**

*Directeur de recherche – CNRS*

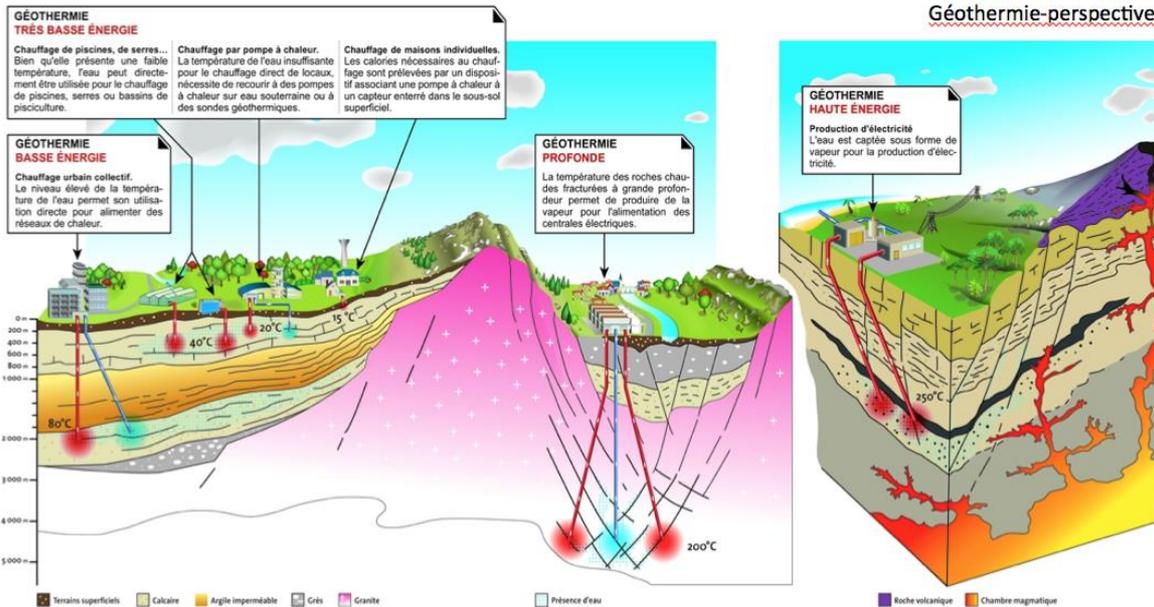
Alors, la géothermie en fait c'est un sujet vaste et il y a clairement différents types de géothermie. Donc, l'objectif de cette séquence c'est d'illustrer un peu les grands domaines et les grands types de géothermie.

⇒ Il y a ce qu'on appelle la très basse ou basse énergie, jusqu'à la haute énergie.

Et puis on abordera un petit peu les points forts et les points faibles pour aller jusqu'à la question de maturité de ces différentes technologies.

Alors, le premier point, c'est de classifier un peu tout ça et de voir que – et cette figure est très illustrative pour ça –, de montrer quelles sont les grandes classes de géothermie.

- Alors, je commencerai par la très basse énergie où on cherche à utiliser une ressource à faible température (typiquement une dizaine de degrés, une vingtaine de degrés), c'est typiquement la ressource liée aux aquifères peu profonds dans les premiers mètres du sol.
- ⇒ Et cette grande classe de géothermie, en fait, elle sera utilisée grâce à un amplificateur qui est la PAC (la pompe à chaleur).
- La deuxième grande classe de géothermie, c'est la géothermie basse énergie où on va chercher à utiliser la chaleur directement, pas besoin d'amplificateur, on essaie d'aller chercher un fluide aux environs de 80°C pour l'utiliser directement dans des réseaux de chaleur.
- La troisième grande classe de géothermie, c'est la géothermie haute énergie et là il y en a deux domaines ou deux types un peu différents.
  - Il y a ce qu'on appellerait la géothermie conventionnelle où on cherche à exploiter l'énergie là aussi directement, sauf que le fluide est à beaucoup plus haute température (de l'ordre de 200°C).
  - Et l'autre grand type non conventionnel où là on peut avoir une température comparable mais il faut stimuler le milieu, le modifier, pour améliorer la perméabilité naturelle qui n'est pas toujours suffisante.



- Alors là vous avez un tableau qui résume un peu ces grandes classes, on retrouve ces trois grands types : la très basse énergie, la basse énergie et la haute énergie.
- Très basse énergie, c'est effectivement pour des nappes profondes et l'utilisation absolue de cette pompe à chaleur qui cherche à amplifier et à extraire la chaleur de cette ressource à basse température pour l'utiliser pour du chauffage ou des situations à températures plus élevées que la ressource.
- Le deuxième type, c'est la basse énergie, l'utilisation directe.
- ⇒ C'est plutôt pour du chauffage urbain, sur des réseaux de chaleur, ou dans des situations industrielles, voir le thermalisme et là, on a une aquifère qui peut-être profond jusqu'aux environs de 1500 mètres en gros, pour clarifier.
- Le troisième type, qui est plutôt le domaine de la géothermie profonde, là, la ressource est à plus haute température, typiquement au-delà de 150°C.
- ⇒ C'est un tout petit point là-dessus singulier à la situation française, c'est que légalement il y a un seuil à 150°C qui est le seuil entre la ressource dite basse énergie et haute énergie qui est défini légalement dans le Code Minier et donc, la température du fluide à la sortie de l'exploitation est cruciale : 149°C, ce sera une situation légale différente de 151°C.
- Donc à partir de 150°C, c'est la géothermie haute énergie avec ses deux grandes rubriques conventionnelle et non conventionnelle et on va voir que cette haute énergie, c'est principalement pour produire de l'électricité, voire de la chaleur complémentaire et que, en fait, la transition entre ces deux idées de plus en plus floues est que la grande technologie qui a été développée (EGS) dont on va détailler tout à l'heure les principaux éléments, est vraiment à la frontière entre ces deux domaines.

Alors, quels sont les points forts tout d'abord de cette géothermie profonde ?

- C'est évidemment une énergie renouvelable ;
  - Son point très important c'est que c'est une énergie non carbonée ;
  - Sa spécificité, peut-être la plus connue, la plus reconnue, c'est la continuité de la ressource.
- ⇒ C'est une source qui ne dépend pas des conditions météorologiques, comme pourrait l'être le solaire ou l'éolien.
- Et qui a un potentiel quand même relativement important, en particulier en métropole.
  - Un autre aspect qui n'est pas toujours pris en compte, c'est que quand ça fonctionne bien, c'est quand même une ressource qui a une faible occupation foncière, puisque l'ensemble de la ressource est de l'échange et en profondeur, c'est-à-dire sous nos pieds et pas au niveau de la surface.
- ⇒ Et donc une implantation plus restreinte que par exemple le développement du solaire ou en tout cas qui peut être aussi plus limitée - en particulier visuellement -, que l'éolien.
- Donc les impacts peuvent être assez limités. Pas complètement mais assez limités.
  - C'est une énergie locale.
- ⇒ Si c'est une production électrique, évidemment elle peut être transportée mais quand même, il y a une grande composante de chaleur qui est, en général, difficile à transporter.
- Une fois qu'elle est en place, en général les coûts de fonctionnement sont relativement réduits.

Bon comme toute technologie, elle a aussi ses points faibles.

- Le plus important, je crois qu'il faut vraiment bien l'avoir présent à l'esprit, c'est l'importance de l'investissement qui est très conséquent, qui peut être très conséquent, et c'est principalement les forages qui sont des coûts très importants.
- ⇒ L'ordre de grandeur, c'est quand même un forage, on peut dire que c'est de l'ordre de 10 millions d'euros, il en faut souvent plusieurs, ça fait vite des projets ambitieux.
- C'est aussi des technologies longues à mettre en œuvre : explorer, forer, exploiter, souvent c'est plusieurs années (de 6 à 8 ans typiquement).
- ⇒ Donc avec un retour sur investissement qui peut être conséquent.

- L'acceptabilité n'est pas triviale. Il y a des questions de sismicité induite, de radioactivité, de bruit aussi, de pollutions d'aquifères qui sont souvent évoquées. C'est un sujet qui est sensible.
- Le risque est important, en particulier géologique et c'est un point qu'il faut noter, parce que typiquement, récemment, il y a eu un développement majeur de cette technologie, en particulier lié à un processus d'assurance qui a été développé et soutenu par l'État qui a permis de lever ce risque et de faire démarrer des projets.
- Il y a des risques hydrauliques au sens qu'il faut réussir à obtenir des débits importants pour avoir ce retour sur investissement et ce n'est pas toujours facile à définir précisément.
- C'est aussi des technologies qu'il faut faire durer pour pouvoir avoir le retour sur investissement, mais au jour d'aujourd'hui, on n'a pas toujours beaucoup de développement, en particulier sur la géothermie profonde non conventionnelle et donc il y a un manque de maturité de cette technologie.
- Enfin, il faut penser et là il y a des points de réflexion, à intégrer cette production dans le cadre du mix énergétique et peut-être, savoir comment introduire une variabilité dans la ressource, dans l'utilisation, contrairement à ce qu'on pense d'habitude pour cette technologie sur son aspect continu.

Alors, si on reprend notre tableau initial et qu'on essaie un peu de faire le bilan sur la maturité de cette technologie, voilà ce qu'on peut dire de façon simplifiée.

- Bien évidemment il y a du développement dans tous les domaines mais globalement, en très basse énergie, la technologie est mature, on sait faire, on sait reproduire assez facilement.
- En basse énergie, on sait faire aussi, il y a des très bons exemples comme dans le bassin de Paris qui fonctionne depuis très longtemps et on peut dire que la technologie est mature.
- Sur l'aspect haute énergie conventionnelle, l'exploitation sans modification sensible du milieu, il y a aussi maintenant beaucoup de retours et beaucoup de développements existants, donc il y a une maturité de la technologie.
- Par contre, sur le domaine non conventionnel où il est nécessaire de modifier le milieu, en particulier par ces technologies EGS, là il reste encore du travail à faire pour que cette technologie soit mature.