



Au niveau des dorsales océaniques, les fumeurs noirs rejettent un fluide sulfuré à des températures relativement constantes, autour de 350-380 °C. Les propriétés physiques de l'eau, si particulières, expliquent ce phénomène. Sur les continents, les systèmes géothermaux montrent tous des signatures thermiques typiques de la convection hydrothermale. L'étude de ce phénomène complexe et discontinu, par le biais de la modélisation numérique, permet de mieux comprendre les circulations de fluide, et donc les caractéristiques des ressources minérales et énergétiques associées.



La convection hydrothermale et les ressources associées

40

MÉTALLOGÉNIE



Laurent Guillou-Frottier

GÉOPHYSICIEN

SERVICE DES RESSOURCES MINÉRALES – BRGM
l.guillou-frottier@brgm.fr

▲
Cheminées hydrothermales au large des îles de Wallis-et-Futuna, identifiées lors de la campagne océanographique Futuna 2010. Ici, le rejet des fluides sulfurés s'est arrêté, démontrant le caractère transitoire des circulations hydrothermales. Quelques kilomètres plus loin, les cheminées actives rejettent un fluide sombre à 347 °C.

© J. Guoin, communication personnelle, membre de la campagne Futuna 2010.
Hydrothermal chimneys off the Wallis-et-Futuna Islands, identified during the Futuna 2010 oceanographic campaign. Here, the discharge of sulphide-rich fluids has ceased, showing the transient character of hydrothermal circulation. A few kilometers away, active chimneys release black fluid at 347°C.

© J. Guoin, pers. comm., member of the Futuna 2010 campaign.

Les circulations de fluides dans la croûte

L'eau circule à la surface de la Terre, dans les profondeurs de la croûte terrestre ainsi que dans le manteau sous-jacent, notamment par le biais des zones de subduction (voir article Jolivet, ce volume). Mis à part les écoulements créés par la topographie (ruissellement et infiltration des eaux superficielles), le moteur de la circulation des fluides dans la croûte profonde peut être thermique ou mécanique, c'est-à-dire que des différences de température, ou des différences de pression, vont guider les écoulements des fluides. En revanche, les propriétés physiques du fluide et de la roche peuvent freiner ou accélérer ces circulations, tout comme les réactions chimiques liées aux interactions entre l'eau et la roche (dissolution et précipitation). Enfin, l'état du fluide (liquide, gazeux, ou supercritique) peut influencer fortement la dynamique des écoulements.

Ainsi, la circulation des fluides crustaux fait intervenir des processus physiques et chimiques qui interagissent les uns avec les autres (voir article Pichavant, ce volume). Le long des dorsales océaniques, par exemple, les roches du manteau sont altérées par l'eau de mer (serpentinisation), et les transformations minérales qui en résultent correspondent à des réactions fortement exothermiques. Ce dégagement de chaleur très important alimente à son tour le moteur thermique des circulations de fluide, et le processus de



serpentinisation peut alors s'auto-entretenir. Sur les continents, l'altération hydrothermale des granites fait également intervenir des réactions fortement exothermiques, comme la chloritisation de la biotite, ce qui pourrait expliquer la présence d'eaux tièdes à faible profondeur. La compréhension de ces phénomènes couplés nécessite la simulation numérique des écoulements, en prenant en compte au mieux les conditions physico-chimiques du fluide et des roches encaissantes.

Les vitesses de circulation des fluides peuvent s'échelonner de quelques cm/an (remontées de fluides chauds dans les zones fracturées) à plusieurs m/s (geysers et fumerolles, *photo 1*). Selon des études expérimentales récentes, la croissance cristalline nécessiterait des vitesses locales des fluides de plusieurs dizaines de m/an [Sizaret *et al.* (2009)]. Le caractère discontinu de ces circulations pourrait expliquer ces différences, ce qui souligne l'importance de simuler les écoulements en régime transitoire.

Les ressources hydrothermales de la Terre, qu'elles soient minérales ou énergétiques, se concentrent là où les circulations de fluide sont les plus « efficaces ». Par exemple, un refroidissement rapide des fluides minéralisés pourra conduire à la formation d'un gisement métallifère, et une remontée rapide de fluides chauds concentrera une ressource géothermale potentielle. Il est donc essentiel de comprendre la dynamique et l'évolution temporelle de ces systèmes pour mieux évaluer, voire prédire, le potentiel de ces ressources hydrothermales.

“
Le moteur de la circulation
des fluides dans la croûte profonde
peut être thermique ou mécanique.”

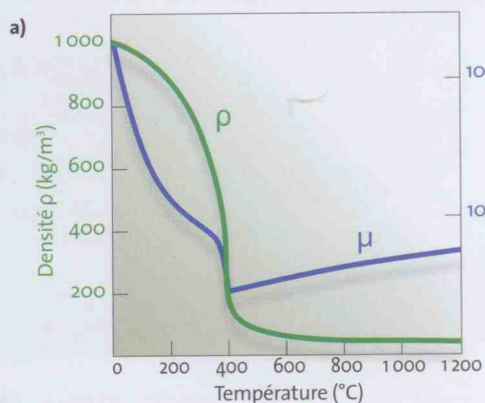
▲
Photo 1 : Geysir de Geysir, en Islande, éjectant de la vapeur d'eau à plusieurs dizaines de mètres de haut.

Photo 1: The Geysir geysir, in Iceland, ejecting hot water and steam up to several tens of meters.

© F. Michel, BRGM Im@gé

► UNE TEMPÉRATURE MAXIMALE POUR LES FUMEURS NOIRS

Quelle que soit la température du magma sous-jacent, les fluides hydrothermaux sulfurés provenant des cheminées hydrothermales de la croûte océanique (les fumeurs noirs) ont des températures qui ne dépassent pas 400 °C, et qui sont le plus souvent comprises entre 350 et 380 °C. Parmi diverses hypothèses, il apparaît que les propriétés physiques du fluide hydrothermal fournissent la meilleure explication. Lorsque le fluide passe de 10 à 200 °C, sa densité ne baisse que de 10 % alors que sa viscosité décroît d'un facteur 10, facilitant la descente de fluides à 200 °C. La densité chute à partir de 300 °C environ, ce qui favorise fortement l'ascension. En fait, il apparaît que la résistance hydraulique est minimale à 400 °C pour l'écoulement ascendant, et minimale à 200 °C pour l'écoulement descendant. Ces températures permettent donc de maximiser l'efficacité du transport énergétique. ■

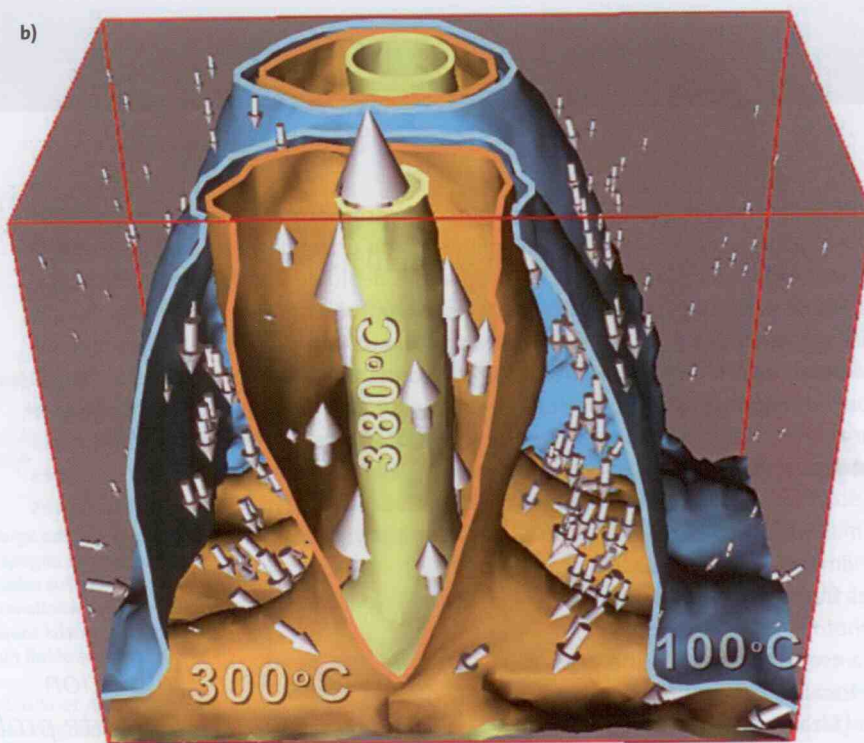


a) Densité et viscosité dynamique de l'eau pour une pression de 30 MPa (environ 3 km de profondeur) ; b) Modèle numérique de circulation hydrothermale dans un fumeur noir, où les isothermes 100, 300 et 380 °C sont représentées (bleu, orange et vert clair) et où les flèches illustrent le flux massique.

D'après Coumou et al. (2008).

a) Water density and dynamic viscosity at a pressure of 30 MPa (at depths of approximately 3 km); b) Numerical model of hydrothermal circulation in a black smoker, where 100, 300 and 380°C isotherms are illustrated (blue, orange and light green) as well as mass fluxes (arrows).

After Coumou et al. (2008).



La convection hydrothermale

Bien qu'à la surface de la croûte terrestre la chaleur s'évacue principalement par conduction thermique, des conditions géologiques locales particulières peuvent mener aux transferts de chaleur par convection thermique. La convection hydrothermale est un mode de transfert de chaleur qui s'effectue par le mouvement des fluides. Lorsqu'un fluide est chauffé, sa densité diminue, et la force d'Archimède qui en résulte peut l'emporter sur les forces résistantes au mouvement, comme celle due à la viscosité du fluide ou à une perméabilité trop faible. Dans ce cas, le système évacue sa chaleur par la circulation du fluide : les fluides chauds légers remontent, se refroidissent en surface du système, deviennent alors suffisamment froids et denses pour redescendre vers la base du système convectif.

Les variations locales du flux de chaleur océanique reflètent les circulations convectives de fluide hydrothermal, celles-ci comprenant des circulations latérales de grande échelle, ainsi que des écoulements verticaux localisés au niveau des cheminées hydrothermales. Lorsque les fluides qui sont expulsés de ces cheminées sont riches en sulfures (les fumeurs noirs) leurs températures sont comprises entre 350 et 380 °C, et ce quelle que soit la température du magma sous-jacent. Ce

phénomène a été expliqué grâce à des simulations numériques qui prennent en compte les propriétés physiques des fluides hydrothermaux (encadré p. 42), mais également par des études de géo-thermo-barométrie de ces systèmes [Fontaine *et al.* (2009)].

À la surface des continents, le flux de chaleur montre également des variations qui peuvent être dues à la présence d'une chambre magmatique sous-jacente. Les températures alors engendrées peuvent faire remonter les fluides crustaux par instabilité gravitaire au travers des zones les plus perméables. Les systèmes hydrothermaux continentaux sont qualifiés de systèmes géothermaux dès que les conditions profondeur-température permettent, économiquement, une exploitation de leur chaleur. À titre d'exemple, le réservoir géothermal de Bouillante en Guadeloupe correspond à un système en convection hydrothermale où des températures de 250 °C sont présentes à 600 mètres de profondeur.

Si les systèmes géothermaux n'ont pas tous les mêmes températures (voir article Barberi et Carapezza, ce volume), les allures des profils thermiques verticaux qu'on y mesure (figure 1) montrent tous un gradient thermique faible au sein du réservoir, ce qui reflète l'homogénéisation thermique créée par la circulation convective.

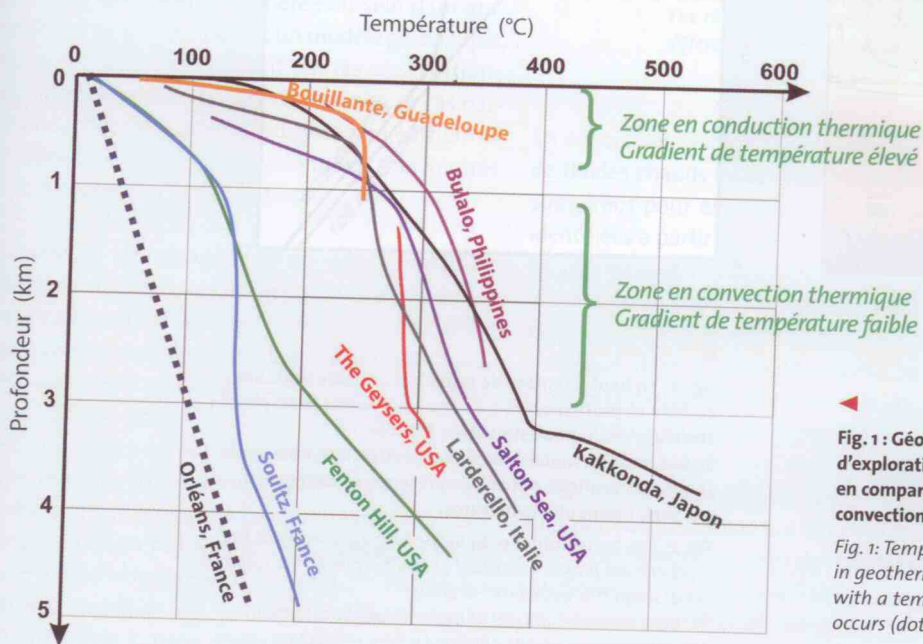
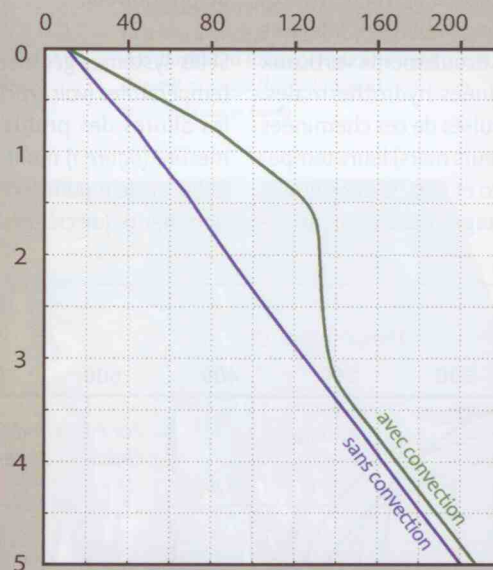
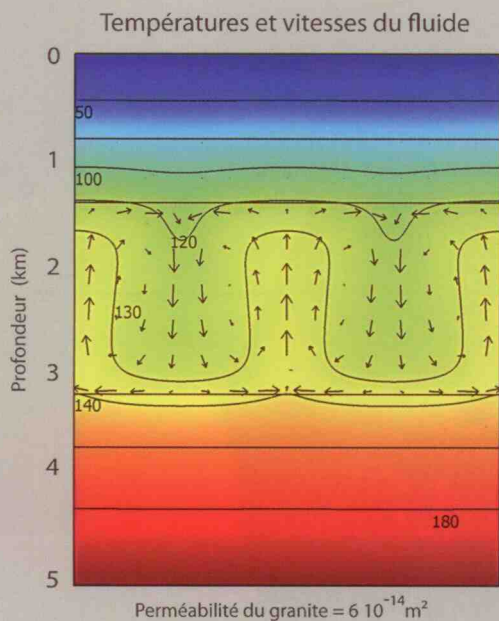
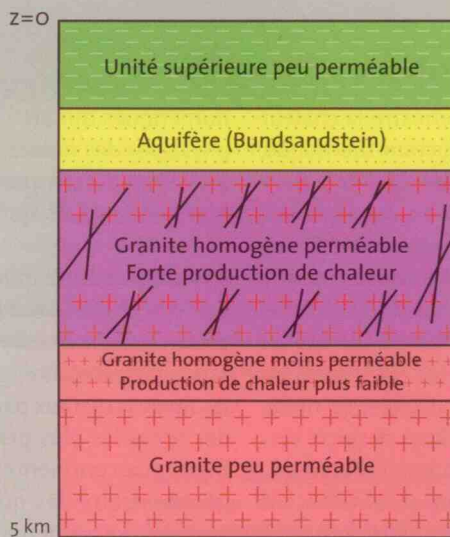
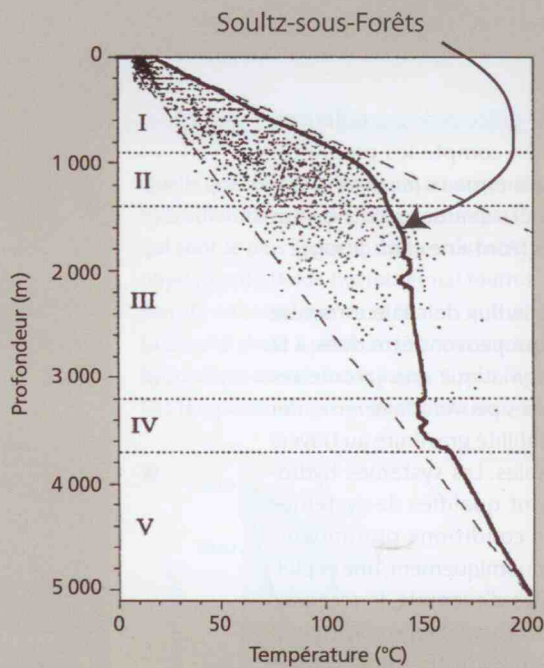


Fig. 1 : Géothermes mesurés dans des forages d'exploration géothermique (traits pleins) en comparaison avec un géo-therme sans convection thermique (trait pointillé).

Fig. 1: Temperature profiles (solid lines) measured in geothermal exploration boreholes compared with a temperature profile where no convection occurs (dotted line).

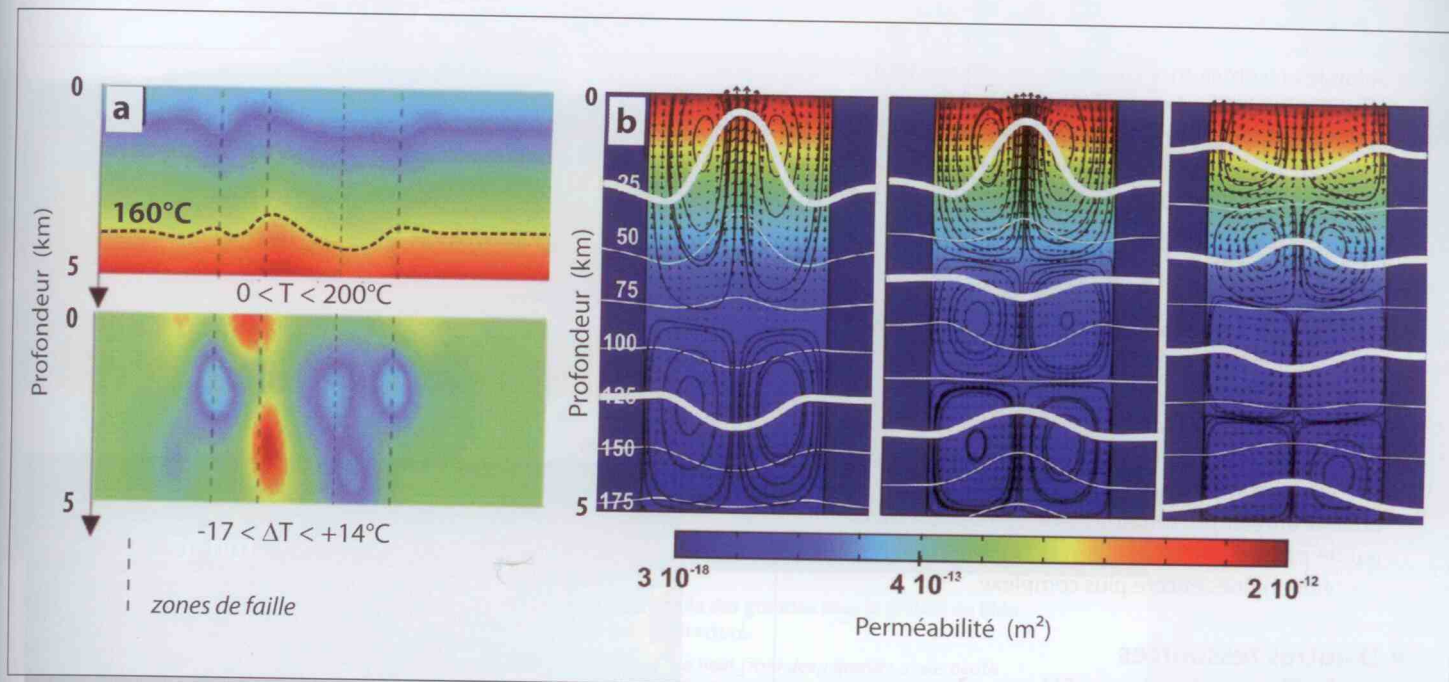
LA CONVECTION HYDROTHERMALE ET LES RESSOURCES ASSOCIÉES



▲ **Fig. 2 :** En haut, données de température dans le graben du Rhin et profil mesuré à Soultz-sous-Forêts (trait plein) ; structure géologique simplifiée à droite. En bas, modèle numérique de convection hydrothermale. Le profil thermique obtenu en présence de convection (en vert) reproduit les mesures.

Fig. 2: Top: temperature data in the Rhine graben with the temperature profile measured at Soultz-sous-Forêts (solid line); right: simplified geological structure. Bottom: numerical model of hydrothermal convection. The temperature profile obtained where convection occurs (green line) fits the measured temperature profile.

“ Les simulations permettent de délimiter les zones possédant un potentiel important. ”



▲ Fig. 3 :

- a) Températures (haut) interpolées sur une coupe ouest-est du bassin du Sud-Est de la France, de largeur 200 km, traversant 4 zones faillées (traits pointillés), et anomalies thermiques associées (bas) ;
 b) Modèles de convection hydrothermale dans une zone faillée de perméabilité variable. Les trois cas, qui montrent de gauche à droite 4, 6 et 8 cellules convectives, correspondent à différentes procédures numériques choisies pour obtenir une solution.

Fig. 3 :

- a) Temperatures (top) interpolated over a 200 km long, west-east section of France's South-East Basin cutting across 4 faulted zones (dotted lines), and associated thermal anomalies (bottom);
 b) Models of hydrothermal convection in a faulted zone with variable permeability. The three cases, depicting, right to left, 4, 6 and 8 convective cells, correspond to different numerical procedures chosen to obtain a solution.

Ces profils thermiques servent de données de calage pour les modélisations numériques qui tentent de reproduire la physique de la convection hydrothermale. La figure 2 illustre un exemple numérique de la circulation hydrothermale générée au sein d'un granite perméable. En considérant un modèle géologique, certes simplifié, mais contraint par les observations de terrain et des mesures sur échantillons, ce cas particulier pourrait correspondre au système géothermal de Soultz-sous-Forêts, car les données thermiques sont reproduites par la simulation.

Néanmoins, la reproduction de données à partir de simulations numériques ne suffit pas à valider le modèle proposé : d'une part, plusieurs modèles peuvent aboutir au même résultat, et d'autre part plusieurs hypothèses simplificatrices peuvent être avancées (fluide non salé, monophasique, pas d'apport extérieur, etc). Aujourd'hui, les codes numériques les plus poussés fonctionnent avec des équations d'état du fluide qui prennent en compte les variations de composition (proportions entre H_2O , NaCl et CO_2), mais aussi les changements d'état (liquide, vapeur ou état supercritique) en fonction de la pression et de la température [Ingebritsen *et al.* (2010)].

En dehors des systèmes géothermaux, des circulations de fluides chauds au sein des zones fracturées ont été suggérées pour expliquer les signatures thermiques identifiées à partir de mesures en fond de forage pétrolier [Garibaldi *et al.* (2010)]. En particulier, la superposition d'anomalies positives et négatives de l'ordre de $\pm 20^\circ\text{C}$ par rapport à la moyenne régionale (figure 3a) peut s'expliquer dans le cadre de la convection hydrothermale, dès que la diminution de la perméabilité avec la profondeur est prise en compte (figure 3b).

En réalité, les zones faillées représentent bien des couloirs perméables, mais sur une période déterminée. Les successions d'épisodes de cristallisation et de dissolution font que la perméabilité est une propriété physique qui dépend du temps, ce qui modifiera inéluctablement la dynamique du système hydrothermal.

Selon les récentes modélisations en régime transitoire, les anomalies thermiques générées laissent leur empreinte thermique pendant plusieurs dizaines de milliers d'années après la fin des écoulements. Ainsi, les mesures de température réalisées aujourd'hui peuvent apporter des informations sur les paléocirculations de fluides.

Malgré les progrès réalisés dans la compréhension de la convection hydrothermale, le phénomène reste difficile à modéliser. Les exemples montrés en *figure 3b* correspondent aux mêmes paramètres physiques, mais la procédure numérique choisie pour arriver à une solution stable est différente. Autrement dit, on obtient différentes solutions stables pour un même jeu de paramètres, ce qui rend la compréhension de ces phénomènes encore plus complexe.

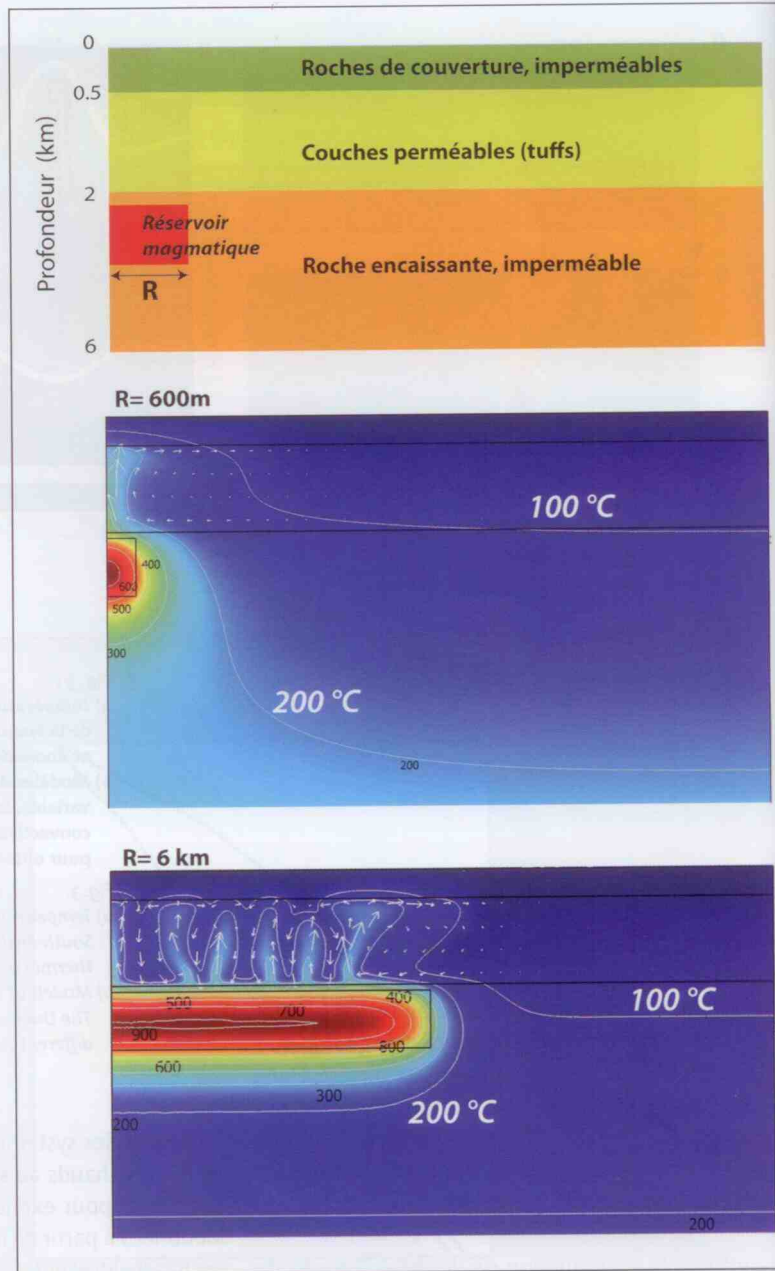
D'autres ressources hydrothermales énergétiques ?

La circulation des fluides de la croûte peut s'effectuer à différentes échelles. L'anomalie géothermique de Soultz-sous-Forêts pourrait ne représenter que l'un des chemins verticaux empruntés par les fluides circulant dans l'ensemble du graben du Rhin. Les mesures de températures dont nous disposons ne sont pas toutes corrigées de façon homogène, et les incertitudes peuvent atteindre 20 à 30 °C à 2 km de profondeur. En d'autres termes, il n'est pas exclu que d'autres systèmes géothermaux exploitables existent en Alsace, mais leur exploration doit commencer par une mise à jour des corrections des données disponibles.

De la même manière, la recherche d'autres sites géothermiques exploitables en Guadeloupe est dépendante de la compréhension du système magmatique-hydrothermal de Bouillante. La grande inconnue reste la géométrie du réservoir magmatique sous-jacent, car si une seule poche magmatique peut n'engendrer qu'une ascension de fluide géothermal, une intrusion magmatique allongée, qui correspondrait à une ramification latérale souterraine, comme sous le Kilauea à Hawaï, pourrait déclencher plusieurs remontées de fluide hydrothermal (*figure 4*).

D'autres ressources hydrothermales minérales ?

Comme pour les ressources géothermales, la potentialité de découvrir de nouvelles ressources minérales dépend également de la compréhension des mécanismes de circulation des fluides crustaux.



▲ **Fig. 4 :** En haut : modèle géologique simplifié de Bouillante, avec un réservoir magmatique de taille variable. Au-dessous, modèles de convection hydrothermale à Bouillante dans le cas d'une poche magmatique isolée (milieu) ou d'un réservoir allongé de 6 km de rayon (en bas). Les courants ascendants (bleu clair) ont tous une température moyenne de 250 °C.

Fig. 4: Top: Simplified geological model of the Bouillante area, with a magma reservoir of variable size. Below: Numerical models of hydrothermal convection in the case of a small (middle) or a 6 km-long (bottom) magma reservoir. All upwellings (light blue) present average temperatures around 250 °C.



Hydrothermal convection and associated resources

Fluid circulation in the Earth's crust involves heat and mass transfer mechanisms which could lead to the formation of hydrothermal resources, either energetic or mineral in nature. When temperature contrasts and rock permeability are strong enough, hydrothermal convection sets in and regulates heat and compositional transfer mechanisms. Besides depending on local geological conditions, features of hydrothermal convection are also described by physical properties of fluids and of embedding rocks. In particular, spatial and temporal evolution of rock permeability controls the conditions for fluid circulation. Moreover, permeability can be affected by chemical reactions occurring during hydrothermal convection. On the one hand, mineral transformations resulting from hydrothermal convection can thermally feed the system thanks to the associated heat production, but on the other, they can also slow down fluid circulation by mineral precipitation which induces a permeability decrease.

Thanks to numerical modelling of the involved physical mechanisms, such complex processes are now better understood. Thus, studies on the evolution of hydrothermal systems help in understanding the formation of ore deposits and the concentration of anomalously hot fluids at shallow depths. In addition to the difficulties inherent to the numerical modelling of these processes, it now seems necessary to account for the temporal evolution of physical properties, and consequently to consider the role of chemical exothermic reactions involved during water-rock interactions.

▲ La centrale géothermique de Soutz-sous-Forêts exploite la chaleur profonde des granites sous le graben du Rhin ; cette chaleur est apportée par les fluides chauds circulant dans le granite fracturé.

Soutz geothermal plant (EGS: enhanced geothermal system) is exploiting the heat from deep granite underneath the Rhine graben; this heat comes from hot fluids flowing through the fractured granite.

© BRGM Im@gé.

Les gisements aurifères orogéniques, qui se localisent le long des grandes failles crustales montrent une répartition plus ou moins régulière, avec des espaces d'environ 20, 45, et 50 km pour les failles de Boulder-Leroy en Australie, de Cadillac au Québec, et d'Ashanti au Ghana, respectivement. Des modèles de convection hydrothermale en trois dimensions ont montré que la variation spatiale de la perméabilité pouvait expliquer la localisation des zones de refroidissement rapide, là où le potentiel de minéralisation est le plus élevé [Harcouët-Menou *et al.* (2009)].

D'autres modèles récents de convection hydrothermale autour des intrusions granitiques ont permis de retrouver les zones qui ont le meilleur potentiel de minéralisation. Les simulations réalisées prennent alors un caractère prédictif, puisqu'elles permettent ensuite de délimiter d'autres zones possédant a priori un potentiel important, mais qui sont inconnues des gîtologies.

Même si la compréhension des circulations hydrothermales ne cesse de progresser, il semble nécessaire de considérer aujourd'hui l'évolution spatiale et temporelle de la perméabilité du système hydrothermal, tout comme le rôle exothermique de certaines réactions chimiques associées aux interactions fluide-roche.

Depuis plusieurs années, les études des systèmes hydrothermaux commencent à se multiplier. Il est à noter que ces développements se réalisent parallèlement aux études des réservoirs géothermiques ou à celles des risques associés au stockage de CO₂. Dans un futur proche, il est probable que d'autres domaines touchant aux problèmes énergétiques, comme la quantification des flux d'hydrogène émis lors des réactions de serpentinisation de la croûte océanique, bénéficient des simulations numériques des processus hydrothermaux où les réactions chimiques seraient prises en compte. ■

“ La potentialité de découvrir de nouvelles ressources dépend également de la compréhension des mécanismes de circulation des fluides. ”

Bibliographie : Coumou D., Driesner T., and C.-A. Heinrich (2008) – The structure and dynamics of mid-ocean ridge hydrothermal systems, *Science*, 321, 1825-1828. – Fontaine F.-J., Wilcock W.-S.-D., Foustoukos D.-E., and D. A. Butterfield (2009) – A Si-Cl geothermobarometer for the reaction zone of high-temperature, basaltic-hosted mid-ocean ridge hydrothermal systems, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10, 5, Q05009, doi:10.1029/2009GC002407. – Garibaldi C., Guillou-Frottier L., Lardeaux J.-M., Bonté D., Lopez S., Bouchot V., and P. Ledru (2010) – Thermal anomalies and geological structures in the provençe basin: implications for hydrothermal circulations at depth, *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 181, 4, 363-376. – Harcouët-Menou V., Guillou-Frottier L., Bonneville A., Adler P.-M. and V. Mourzenko (2009) – Hydrothermal convection in and around mineralized fault zones: insights from two- and three-dimensional numerical modeling applied to the Ashanti belt, Ghana, *Geofluids*, 9, 116-137. – Ingebritsen S.-E., Geiger S., Hurwitz S. and T. Driesner (2010) – Numerical simulation of magmatic hydrothermal systems, *Rev. Geophys.*, 48, RG1002, doi: 10.1029/2009RG000287 – Sizaret S., Branquet Y., Gloaguen E., Chauvet A., Barbanson L., Arbaret L. and Y. Chen (2009) – Estimating the local paleo-fluid flow velocity: new textural method and application to metasomatism, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 280, 71-82.