

La géothermie aujourd'hui

*François Audubert et Roland Mahéroult,
membres de la SAGA.*

La prise de conscience de la raréfaction des sources d'énergie fossile, notamment pendant la crise pétrolière de 1973, accrue par les risques causés par le réchauffement climatique lié aux émissions des gaz à effets de serre (CO₂, CH₄, etc.) fait partie des préoccupations actuelles majeures. La diminution de la couche d'ozone stratosphérique au-dessus de l'Antarctique depuis le début des années 1980 et l'établissement de son lien avec les composés chlorofluorocarbonés (CFC) utilisés dans les réfrigérateurs, a été elle-même un épisode aigu de la prise de conscience du fait que l'homme peut fragiliser, voire détruire son environnement.

Il est proposé depuis plusieurs années, par de nombreux gouvernements, dont ceux de l'Union Européenne, de substituer progressivement aux sources d'énergies fossiles de nouvelles énergies qui seraient quasiment inépuisables, dites renouvelables, et qualifiées de vertes car fournies par le Soleil ou par notre planète elle-même, avec une production minimale de déchets.

En France, le Grenelle de l'environnement de 2007 visait à prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et de développement durable.

L'objectif fixé par l'Union Européenne à la France était de 23 % d'énergie renouvelable en 2020, alors que le pays devrait selon les spécialistes faire au mieux 18 %. Ceci témoigne de choix difficiles à faire, de contradictions, de difficultés économiques, industrielles, sociétales. Les différentes conférences internationales sur le climat (COP) (1) qui devaient donner lieu à des accords pour contenir le réchauffement global observé à la surface de la Terre, sont loin d'avoir abouti elles-mêmes pour le moment. Parmi les formes d'énergies renouvelables, l'éolien et le photovoltaïque sont actuellement en plein développement. D'autres sources d'énergie sont plus discrètes, comme par exemple l'utilisation de la biomasse, et n'occupent

qu'une place modeste dans ces renouvelables.

C'est dans cette dernière catégorie que se place la géothermie. Dans ce contexte, nous évoquerons les différents moyens pour exploiter cette énergie. Nous exposerons les réalisations actuelles en France et brièvement dans le monde, et nous essayerons de répondre aux questions relatives à cette forme d'énergie, notamment quelles sont les difficultés que rencontre son exploitation, quelle place peut prendre cette ressource dans l'apport énergétique global (le fameux « mix énergétique ») à moyen terme. Chemin faisant, nous nous interrogerons sur le caractère « renouvelable » de la géothermie puisque les énergies labellisées ainsi sont liées dans les esprits à leur maintien à long terme, mais aussi au respect de l'environnement.

1 - La terre et sa chaleur

Les manifestations du flux de chaleur interne de la Terre ne manquent pas et sont connues depuis longtemps : volcanisme, sources d'eau chaude, augmentation de la température dans les mines.

1.1. Origine de la chaleur

On considère aujourd'hui que la chaleur interne de la Terre provient de deux sources principales : la chaleur primitive et la radioactivité.

• La chaleur primitive

Selon la théorie de l'accrétion homogène, la Terre se serait formée par l'agglomération de gaz, de poussières, puis par la capture gravitationnelle de corps célestes de plus en plus gros. Chaque corps qui heurte alors la proto-Terre convertit son énergie cinétique en chaleur. Puis c'est le processus de différenciation qui d'une Terre de composition assez homogène conduit à

une redistribution des éléments chimiques d'une densité décroissante depuis son centre jusqu'à la surface. L'énergie cinétique des impacts et la réorganisation en couches concentriques de ses constituants produisent une quantité de chaleur considérable.

• La radioactivité

Dans le même temps, se produit la désintégration des isotopes radioactifs, en particulier ceux à courte période comme l'aluminium et le fer. Celle-ci est aujourd'hui terminée mais celle des isotopes à longue période tels l'uranium, le thorium et le potassium qui se poursuit est à l'origine de la majorité de la chaleur produite dans la croûte terrestre. D'après les estimations, cela représente environ 90 % de la chaleur actuelle de la Terre.

1.2. Le refroidissement de la Terre

Deux mécanismes assurent le transfert de la chaleur depuis son centre chaud vers sa surface froide :

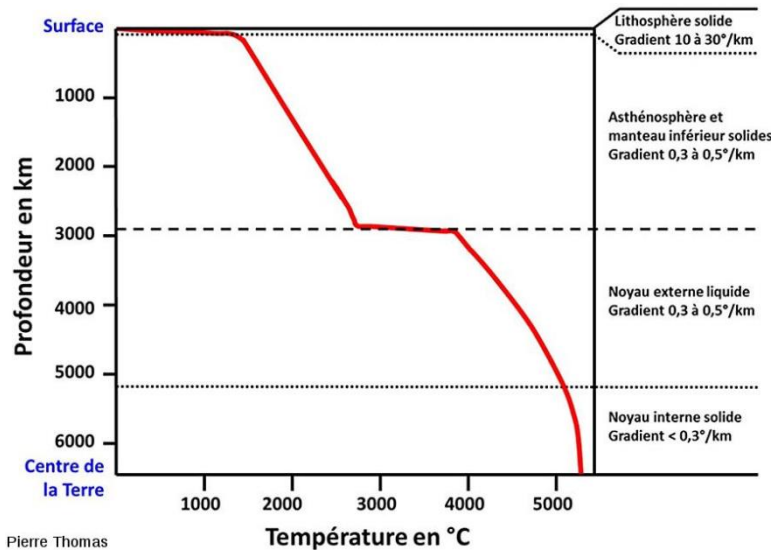
1 - la convection, où l'échange de chaleur se produit par déplacement de matière sous l'effet du changement de masse volumique d'origine thermique. Elle a dû être très efficace lors de la première phase du refroidissement de la Terre alors en grande partie liquide. Aujourd'hui, elle se poursuit beaucoup plus lentement dans le manteau et l'asthénosphère, mais participe pourtant grandement à « la vie » de la Terre : tectonique des plaques avec toutes les conséquences sur le gradient géothermique et le flux de chaleur que cela implique aux limites de celles-ci, subduction, volcanisme, formation des dorsales, remontées de l'asthénosphère avec amincissement de la croûte ;

2 - le second mécanisme est la conduction : la croûte terrestre solide et rigide ne permet plus à la convection de s'exercer et la chaleur qui remonte du manteau ne peut alors s'évacuer que par conduction, transmission de l'énergie dans le milieu par la collision des molécules entre elles, processus en action dans la lithosphère et la croûte terrestre. Hors limites de plaques, ce transfert se fait lentement et la croûte terrestre se comporte comme un bouclier thermique emmagasinant un stock de chaleur considérable.

1.3. Le bilan thermique

• Le gradient géothermique

• Dans le sous-sol, la température augmente avec la profondeur : c'est le gradient géothermique (figure 1). Les mesures sur le terrain, réalisées lors de forages, montrent un gradient moyen de 30 °C par kilomètre dans la plupart des régions dites stables.



Pierre Thomas

Figure 1. Le gradient géothermique, d'après Pierre Thomas (ENS Lyon). On distingue deux zones à forte augmentation de chaleur : la lithosphère solide et la limite manteau/noyau.

Il peut atteindre 100 °C par kilomètre (voire plus, comme en Alsace) à proximité de sites particuliers liés aux limites de plaques, zones volcaniques ou tectoniques actives.

• Le flux géothermique

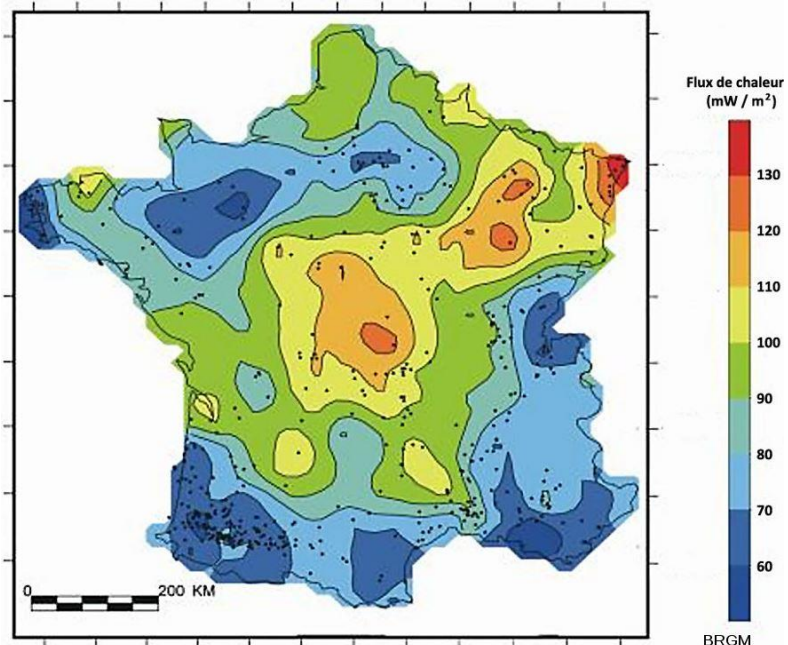


Figure 2. Le flux thermique (BRGM). Les points noirs indiquent les forages réalisés pour l'étude du flux de chaleur. C'est au nord de l'Alsace que le flux thermique est le plus fort.

La quantité de chaleur dissipée par unité de surface et de temps constitue le flux géothermique (figure 2).

À la surface de la croûte terrestre, il varie en fonction du gradient géothermique et de la conductivité thermique des roches, connue grâce aux expériences en laboratoire. On estime aujourd'hui que la Terre perd environ 46 TW par an (1 TW = 10^{12} W, équivaut à la puissance fournie par 1 000 tranches de centrales nucléaires usuelles). Ce flux n'est malheureusement pas exploitable car de trop faible intensité par unité de surface et de temps. C'est donc dans les réservoirs géothermaux (aquifères superficiels et profonds) de la croûte terrestre où est stockée une quantité de chaleur considérable qu'il faut la rechercher.

2 - Ressources géothermales et circuits géothermiques. Qu'est-ce que la géothermie ?

La géothermie est l'utilisation par l'homme de la chaleur contenue dans le globe terrestre. Le terme géothermal a trait à la ressource naturelle, la chaleur qui provient du sous-sol. Le circuit d'utilisation alimenté par cette ressource géothermale est dit géothermique.

L'énorme réserve d'énergie de la Terre est difficile à exploiter. La température du noyau de la Terre est estimée actuellement à près de 6 000 °C (voir chapitre précédent). S'il est hors de question dans un proche avenir d'atteindre les zones profondes de la Terre, les couches superficielles sont de plus en plus utilisées pour en prélever la chaleur. Les géologues ont classé les ressources géothermales selon des critères énergétiques et techniques, c'est-à-dire *grosso modo* en fonction des domaines de températures auxquels on s'adresse.

Ainsi, on distingue :

- **la géothermie dite de très basse énergie** [on dit aussi basse température, ou basse enthalpie (2)], qui exploite les ressources géothermales inférieures à 30 °C. C'est le domaine des aquifères superficiels et de l'utilisation des pompes à chaleur ;
- **la géothermie basse énergie**, qui exploite des ressources se trouvant dans une zone de températures entre 30 et 90 °C. C'est le domaine des aquifères profonds présents dans les grands bassins sédimentaires ;
- **la géothermie moyenne énergie**, pour les températures comprises entre 90 et 150 °C, qu'on trouve dans des secteurs à fort gradient géothermique. Elle peut être utilisée en usage couplé chaleur-énergie, et de l'électricité peut être produite grâce à l'utilisation de fluides organiques, comme l'isobutane dont la température d'ébullition est plus faible que celle de l'eau. L'eau géothermale cède sa chaleur à ce fluide secondaire à travers un échangeur, et la vapeur de ce fluide est alors utilisée pour entraîner une turbine et un alternateur ;

- **la géothermie haute énergie** ($t > 150$ °C), dite géothermie profonde, de roche chaude et sèche (*High Dry Rocks*). Cette géothermie est directement exploitable pour la production d'électricité. On va ici chercher les calories dans des zones faillées du socle cristallin à des profondeurs de 3 000 à 5 000 m ;

- **la géothermie très haute énergie**, qu'on exploite dans certaines régions de volcanisme très récent qui présentent un gradient géothermique très élevé à des profondeurs situées entre 500 et 1 500 m. De plus, certaines régions volcaniques, qui produisent des eaux très chaudes ou de la vapeur éjectée sous forte pression, ont parfois donné lieu à exploitation.

Des projets existent enfin pour exploiter directement la chaleur des volcans à partir de leur lave.

Chacune de ces zones de températures va donner lieu à une ou plusieurs filières différentes utilisant des techniques adaptées à chacune d'elles que nous allons évoquer.

3 - Brève histoire de la géothermie

Depuis des temps très anciens, les hommes ont utilisé les eaux thermales soit pour se chauffer, soit pour en utiliser les propriétés bienfaisantes. Dans la Rome antique, les eaux chaudes étaient captées et servaient à chauffer les bains thermaux.

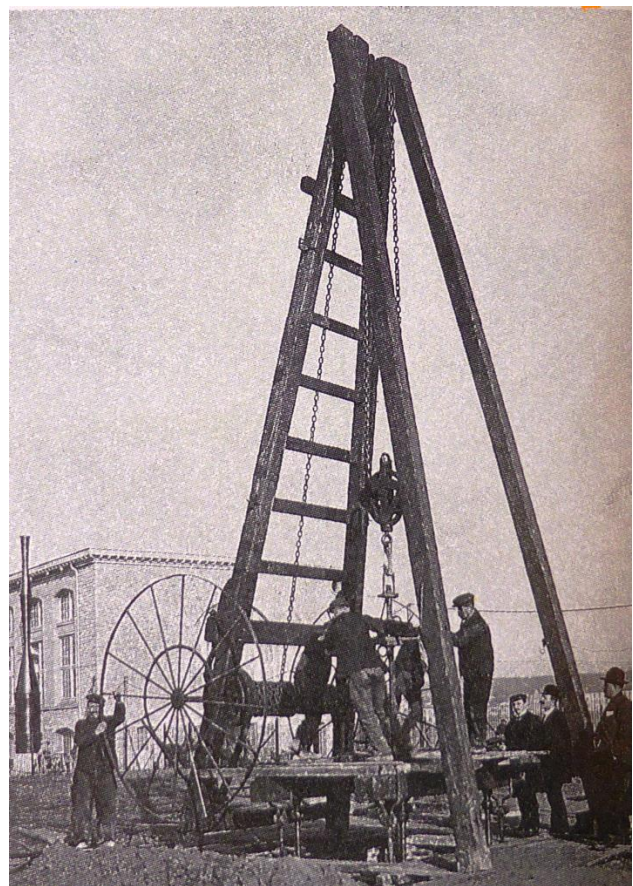


Figure 3. Le forage de Grenelle en 1841. (Photo J. Laurent).

Le premier réseau connu de distribution géothermique a été réalisé à Chaudes-Aigues (Cantal) où l'eau émerge à 82 °C à la source du Par. Dès 1330, ce réseau d'eau chaude naturelle alimentait les maisons du bourg. Le vieux village est encore chauffé actuellement par ces eaux.

Au XIX^e siècle, les techniques de forage ont permis d'accéder à l'eau profonde ; ainsi, le forage de Grenelle du 26 février 1841 a été le premier forage profond, atteignant 548 m dans l'Albien et donnant le puits artésien d'eau potable de Grenelle (figure 3).

En Toscane, à Larderello, des forages ont été réalisés dans la première moitié du XIX^e siècle avec des sondes à vilebrequins. Et, en 1904, un premier moteur de 0,75 CV utilisant la vapeur naturelle fut couplé à une dynamo, le tout produisant une faible énergie électrique. En 1939, l'exploitation de la Toscane a été améliorée et se poursuit actuellement avec les moyens modernes fournissant de l'électricité à près d'un million de foyers.

Dans l'Île nord de la Nouvelle-Zélande, dans une zone comportant des sources de vapeur, une soixantaine de forages ont été réalisés, avant 1959, jusqu'à 1 300 m de profondeur, pour produire de l'électricité.

Au XX^e siècle, se sont développées également des techniques visant à utiliser les ressources en chaleur du sous-sol à partir de nappes phréatiques. La Maison de la Radio, à Paris, fut équipée d'un chauffage géothermique puisant dans la nappe de l'Albien, en 1956. En 1969, à Melun, fut expérimentée pour la première fois la technique du doublet (voir chapitre 4). En 1973, le premier choc pétrolier incita les acteurs économiques à développer des filières économisant le pétrole, notamment celle de la géothermie. En 1987, le contre-choc pétrolier freine cette fois complètement l'élan de ces filières.

Depuis quelques dizaines d'années, la géothermie a avancé dans plusieurs directions, depuis les pompes à chaleur individuelles jusqu'à la géothermie haute énergie qui permet de produire de l'électricité.

Le Grenelle de l'environnement de 2007 a été à l'origine d'une nouvelle impulsion pour les énergies dites « renouvelables », aidées par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et par le Fonds Chaleur.

Actuellement, malgré le prix du pétrole redevenu bas, les inquiétudes sur le climat contribuent à relancer ces énergies, et parmi elles la géothermie.

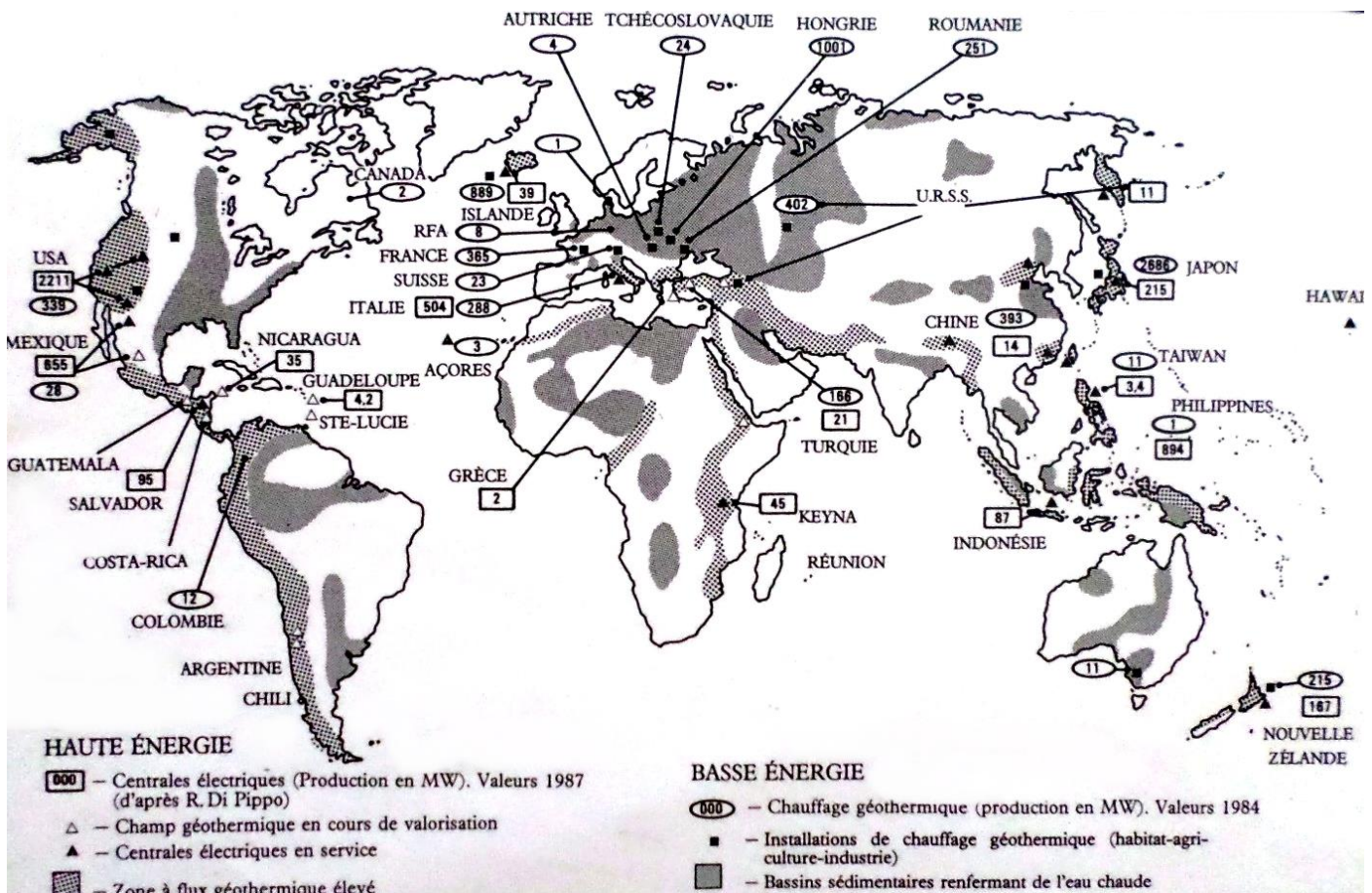


Figure 4. Carte de la basse et de la haute énergie dans le monde (document BRGM).

4 - La géothermie sur aquifère profond

4.1. Quarante-cinq ans d'exploitation géothermique à Melun-l'Almont (77)

« Site pionnier en France, le puits de Melun fête en cette année 2009 ses 40 ans », nous dit un article de journal (3).

En effet, cette première centrale d'Île-de-France a été construite en 1969, et mise en service en 1971 pour le chauffage du quartier de l'Almont, situé dans l'est de la ville de Melun. Selon la fiche technique communiquée sur ce site, l'eau y est pompée dans la nappe du Dogger, à une profondeur maximum de 1 967 m, et une température de 75 °C.

Pour la première fois, la technique du doublet (voir chapitre 4.3.1) a été utilisée, évitant ainsi le rejet dans l'environnement superficiel de l'eau puisée. L'eau géothermale puisée dans le sol assurait pour les 2/3 le chauffage de 6 500 logements.

Depuis cette période, on a assisté à une forte extension de l'utilisation de la géothermie en Île-de-France, surtout à l'est et au sud-est de Paris, exploitant principalement la nappe du Dogger, et ce sont maintenant plus de 170 000 équivalents logements (4) et plus de 700 000 franciliens qui sont ainsi chauffés par géothermie. Cette tendance se poursuit actuellement et, à côté des réhabilitations d'installations anciennes, plusieurs centrales sont en cours de construction (voir chapitre 5-3).

Dans le monde, les grandes zones pourvues d'aquifères utilisables se situent notamment à l'est de l'Europe, en Asie centrale, en Chine, à l'est de Pékin, en Argentine, dans les bassins du Rio de la Plata, de l'Amazone, du Mississippi-Missouri, et en Australie (figure 4, page ci-contre).

Environ 70 pays exploitent cette ressource géothermique pour la production de chaleur, dont la Chine, les USA, la Turquie, l'Islande, l'Italie, la Hongrie...

4.2. Les aquifères en Île-de-France et en France.

Leur choix par les opérateurs de géothermie

En un bref rappel (5), les aquifères sont constitués de trois éléments :

- 1, une couche de roche poreuse ou microfaillée constituant la roche réservoir dans laquelle l'eau est contenue, absorbée comme dans une éponge ;
- 2, l'eau plus ou moins chargée de sels qui remplit tout ou partie de cette roche ;

- 3, une couche imperméable, argile, marne, roche compacte, qui empêche ou limite la progression de l'eau vers le bas.

Ces aquifères sont utilisés comme réserve d'eau potable (nappe de Champigny, nappes de l'Éocène, Albien), pour les besoins de l'agriculture (nappe de Beauce), pour le stockage des eaux, pour la géothermie, pour le stockage de gaz.

Les aquifères qui intéressent la géothermie sont principalement les aquifères profonds (en principe les plus chauds) des bassins sédimentaires (jusqu'à plus de 3 000 m). Les aquifères superficiels sont appelés nappes phréatiques (6) ; ils se situent à moins de 200 m de profondeur et sont à une température assez constante. Dans la réalité, on a souvent affaire à des aquifères multicouches (cas du Dogger) et à des aquifères qui peuvent communiquer entre eux (exemple Albien-Néocomien), dont la complexité vient du fait que les différentes couches de terrains peuvent être discontinues et par endroits hétérogènes. Certains aquifères font référence à plusieurs époques géologiques qui se superposent (exemple : nappe de la craie et nappe alluviale de la Seine). Les aquifères peuvent contenir de l'eau douce ou de l'eau salée ou corrosive, ce qui aura une importance certaine sur la durée de vie et sur l'entretien des installations géothermiques (voir chapitre 4.4).

En France, c'est surtout dans le Bassin parisien que sont présents à la fois des aquifères propices aux opérations de chauffage géothermique et une densité urbaine importante qui permet de rentabiliser les installations. L'aquifère du Dogger, dont la température atteint plus de 80 °C dans l'est et le sud de la Seine-et-Marne, y est particulièrement sollicité.

La figure 5 (page suivante) indique les principaux aquifères des terrains sédimentaires depuis le Mésozoïque.

Certains sont encore peu connus des géologues et font l'objet d'études à des fins d'utilisation en géothermie (voir chapitre 7).

4.3. Le Dogger du Bassin parisien, champion de la géothermie basse énergie. Les réseaux de chaleur en Île-de-France

Le Dogger (de – 154 à – 170 Ma) est une formation du Jurassique moyen. L'aquifère du Dogger (plus de 5 000 km²) provient principalement d'un niveau de calcaire oolithique ainsi que de calcaire comblanchien formés lors du développement de la plateforme carbonatée du Bathonien et du Callovien inférieur (figure 6). Le Dogger est également bien connu comme le principal piège à hydrocarbures du Bassin parisien.

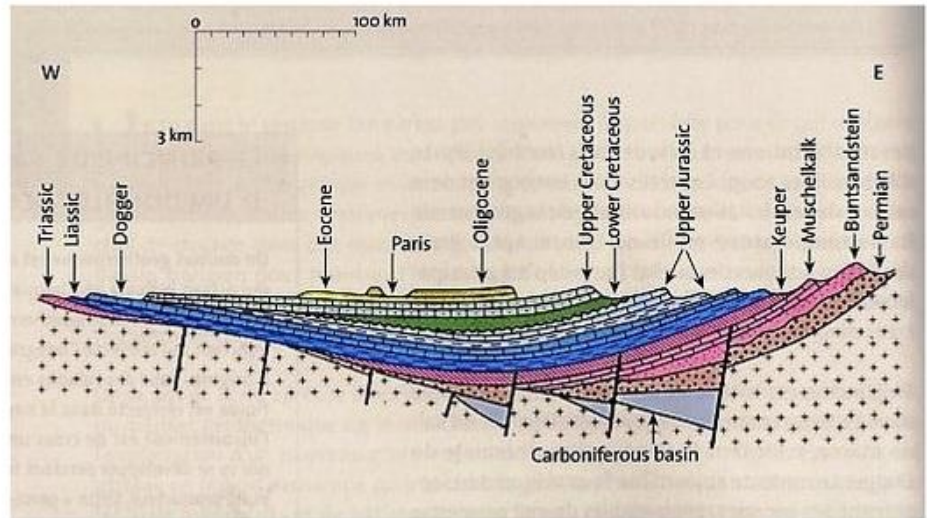
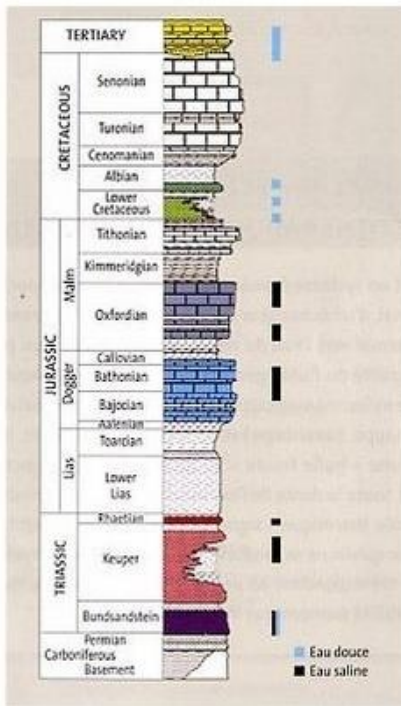


Figure 5. Coupe lithostratigraphique du Bassin parisien avec localisation des principaux aquifères. (Document BRGM, département géothermie).

En 2011, trente-cinq exploitations utilisaient le Dogger en Île-de-France. Plusieurs autres projets sont en cours ou à l'étude grâce à la relance qui prévaut depuis 2005. Ainsi, en 2015, cinq nouveaux réseaux de chaleur sont créés : Bagneux, Arcueil-Gentilly, Villepinte, Rosny-sous-Bois, Villejuif.

Les centrales de géothermie sont créées à la suite de la décision d'une ou de plusieurs communes d'établir un réseau de chaleur pour assurer le chauffage d'immeubles et d'équipements publics incluant bureaux, piscines, médiathèques, etc., pour profiter d'une énergie non polluante et moins chère que le gaz et le pétrole. Les communes peuvent pour cela soit s'adresser à un opérateur privé qui obtiendra une concession à long terme sur le réseau, en délégation de service public, avec paiement par la municipalité d'un loyer annuel pendant la durée de la concession, soit faire un montage avec structure de gestion publique.

Ces opérations nécessitent des études préalables concernant la viabilité et la rentabilité de l'opération, et une étude d'impact environnemental puisqu'il faut prévoir des emplacements suffisants pour installer en milieu dense les engins de forage et la pose de tuyauterie dans les rues.

4.3.1. Le principe des forages en doublets

Cette technique mise au point en France a été conçue pour d'une part maintenir constant le niveau de l'aquifère, d'autre part pour éviter de rejeter les eaux salées du Dogger en surface.

Elle consiste à forer deux puits dont les extrémités seront séparées par une distance suffisante pour que les eaux dont les calories ont été prélevées ne viennent pas au rejet refroidir l'eau au voisinage du prélèvement (percée thermique), au moins dans les trente premières années d'exploitation, durée du permis d'exploitation initiale.

Cette distance est choisie d'un à un kilomètre et demi pour les forages du Dogger. Un premier puits pour le pompage de l'eau chaude est appelé puits de production. Par l'autre puits, appelé puits de réinjection, l'eau géothermale dont on a prélevé des calories est réintroduite dans l'aquifère.

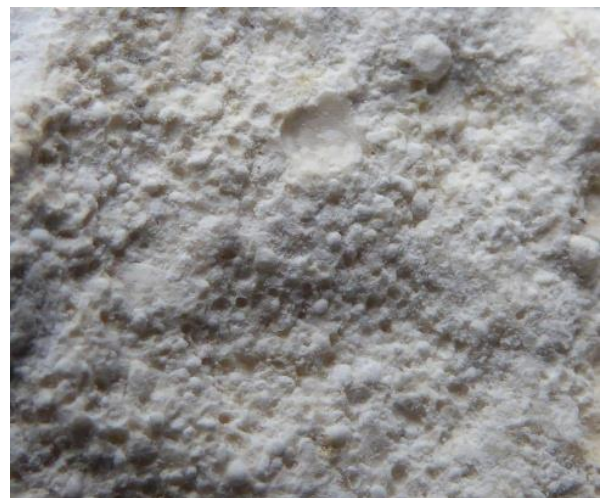


Figure 6. Le calcaire oolithique de la base du Callovien, provenant de la falaise de Saint-Moré (89) en bordure de la Cure.

Les pouvoirs publics imposent une température de réinjection d'au moins 30 °C. Les deux puits peuvent être forés en deux points verticaux distants d'un kilomètre, mais le plus souvent parce que la place disponible au sol est limitée (figure 7), un premier puits vertical est foré, et à quelques mètres le deuxième puits sera foré en biais par des techniques de forage dirigé, ceci à partir d'une certaine profondeur (400 m à Arcueil) selon un angle de 30 à 45°.

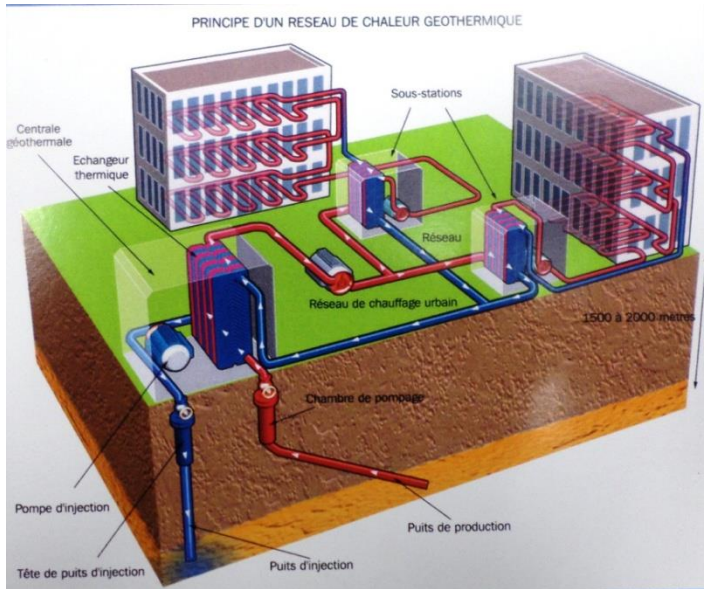


Figure 7. Schéma d'un forage en doublet et du réseau de chaleur. (Document BRGM).

Afin d'obtenir des débits suffisants, des pompes sont utilisées. Pour le prélèvement de l'eau, on utilise en général une pompe immergée placée à environ 400 m de profondeur ; elle est munie d'un moteur électrique alimenté par un câble fixe qui aboutit en surface à la tête de puits (figure 8).

Pour la réinjection, la pompe est placée en surface ; elle communique à l'eau géothermale la pression nécessaire pour son refoulement dans l'aquifère.



Figure 8. Tête de puits de production à la centrale de Chevilly-Larue (photo R. Mahéault).

4.3.2. Les différentes phases de l'installation du réseau.

Les travaux de terrain d'une installation complète en géothermie profonde durent environ deux ans, selon l'importance du réseau projeté et selon les caractéristiques locales de la nappe ; des difficultés de forage ou d'exploitation peuvent aussi se présenter : présence de gaz, difficultés de réinjection, etc. Ces travaux comportent le forage du doublet géothermique, la construction du réseau de chaleur avec pose des conduits, et la construction de la centrale géothermique et des sous-stations.

Le forage

Les techniques de forage sont analogues à celles de l'industrie pétrolière. Cependant, les conditions diffèrent parce que, le forage de géothermie s'effectuant en milieu urbain, il lui faut un minimum de place pour amener et installer la machine de forage. Ceci induit des nuisances de circulation automobile et des nuisances sonores, le chantier travaillant jour et nuit.

À titre d'exemple, la société ARGEO, qui vient d'effectuer les travaux de géothermie à Arcueil-Gentilly, nous donne un aperçu de la temporalité des opérations : les travaux de forage durent environ cinq mois, y compris l'installation du chantier et des engins de forage. Les opérations débutent par un pré-forage avec une machine de forage légère, ce qui a pour but de permettre, en tassant le terrain superficiel, de préparer une plateforme stable pour l'installation de la foreuse définitive beaucoup plus lourde.

Les pré-forages sont tubés et cimentés ; ils descendent à moins 50 m. Le mât de forage, ou derrick, est ensuite monté, ce qui prend sept jours ; il atteint 40 m de haut. La machine qui transmet le mouvement aux tiges a une capacité de traction de 200 tonnes et peut forer à plus de 3 000 m.

Le forage rotatif, ou « rotary », est réalisé grâce au trépan tricône muni de molettes dentées à crans d'acier ou de carbure de tungstène (figure 9).



Figure 9. Tréfans tricônes de différents diamètres utilisés pour les forages Rotary (photo F. Audubert).

Des tubes de forage stockés sur le derrick sont vissés les uns à la suite des autres en fonction de la progression du forage (figure 10).



Figure 10. Le mât de forage et la réserve de tubes (photo : mairie de Ris-Orangis).

Le poids des tubes entraînés en rotation par une tête de rotation permet au trépan de hacher peu à peu le terrain. L'ensemble tige et trépan constitue le « train de tiges ». Les forages s'effectuent en trois à cinq séquences, le diamètre des tubes étant de plus en plus petit à mesure que le forage progresse, proche de 60 cm au sol et de 15 cm au fond. Les débris sont remontés à la surface grâce à une boue à bentonite (figure 11) qui est injectée à l'intérieur des tiges et remontée sur les bords externes.



Figure 11. Sur la plateforme de forage, le quartier des boues (photo mairie de Ris-Orangis).

Cette boue a aussi pour fonction de refroidir le trépan entre les tubes et les parois du trou ; elle fournit également une contre-pression qui stabilise les parois du trou et empêche les arrivées intempestives d'eau ou de gaz provenant des couches traversées ; son rôle est donc fondamental.

Tout au long du forage, les géologues de l'équipe suivent dans leur local, à côté de la plateforme, la progression du forage sur un écran où sont affichées les valeurs des mesures effectuées à partir de sondes disposées à l'intérieur de la tête de forage. Elles concernent notamment la profondeur, la température, la résistance et la porosité des roches traversées, la teneur en eau, la présence de gaz (H_2S , CO_2 ...), l'angle de forage, etc. Ces mesures sont appelées des diagraphies.

Entre les bords externes des tubes d'acier et le trou de forage, du ciment de laitier à base de chaux et de laitier de hauts-fourneaux est introduit ; il a la propriété de durcir fortement en milieu humide. Les tubes ainsi cimentés serviront à l'arrivée d'eau en surface et aussi à maintenir la stabilité des terrains et à éviter la communication entre les différents aquifères qui pourraient être traversés par le forage ; ils fournissent aussi une certaine protection contre la corrosion externe de l'acier. Lorsque le forage atteint l'aquifère, les tubes peuvent être équipés d'une crépine destinée à filtrer les matières solides éventuelles.

Le forage du puits de production est suivi du déplacement de la foreuse à quelques mètres du forage du puits de réinjection, celui-ci étant effectué en technique inclinée.

À la fin des forages, des essais sont effectués pour déterminer la puissance du puits : mise en eau du circuit, évaluation de la productivité et de la capacité de réinjection.

Le principal paramètre caractérisant la productivité d'un aquifère est la transmissivité. Il régit le flux d'eau qui s'écoule par unité de largeur d'un aquifère continu. Il est égal au produit de la perméabilité du réservoir par l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère. La perméabilité représente l'aptitude d'une couche de terrain à se laisser traverser par un fluide ; elle est égale au rapport du débit de l'eau à la section du terrain traversé. Selon la valeur de la transmissivité, le géologue pourra estimer le potentiel de l'aquifère en terme de débit.

Dans le Dogger d'Île-de-France, un débit de 200 m³ par heure est couramment atteint et considéré comme satisfaisant pour réaliser un réseau de chaleur ; dans certains endroits, le débit peut atteindre 300 à 350 m³ par heure, voire plus.

4.3.3. Le réseau de chaleur

C'est un réseau de chauffage urbain qui peut inclure des sources de chaleur de toute nature : géothermie, gaz naturel, incinération des ordures ménagères, énergie solaire, etc. Pour la géothermie, la construction du réseau comporte la mise en place dans la ville des tuyaux de circulation et l'installation du réseau de distribution de l'eau chaude ainsi que des échangeurs

thermiques (voir figure 7). Les tuyaux sont en dérivés de polyéthylène ou en acier pré isolé ; ils sont installés en tranchée sur couche de sablon (figure 12) ; leur diamètre est d'environ 20 cm pour le circuit primaire.



Figure 12. Pose des conduits des réseaux de chaleur sur sablon, à Arcueil (photo F. Audubert).

Le réseau est organisé en une structure de deux à cinq tubes parallèles qui transportent l'eau à des températures différentes. L'eau à 74 °C du circuit géothermal, dit primaire (salée pour le Dogger), n'est jamais en contact avec l'eau des circuits secondaires de chauffage. Elle cède ses calories au circuit secondaire par l'intermédiaire d'un échangeur thermique de haute capacité constitué de fines plaques d'acier ou de titane plus résistant à la corrosion.

L'eau du circuit primaire refroidie est ramenée par les tuyaux du circuit primaire à la chaufferie. Le réseau secondaire chauffe ainsi une boucle interne aux bâtiments en adaptant le débit et la température aux besoins des usagers.

Les sous-stations produisent d'une part de l'eau à 50 °C pour le chauffage, d'autre part de l'eau chaude sanitaire à 60 °C. Une sous-station comporte un échangeur de chaleur, des pompes de circulation et des vannes ainsi qu'un système automatique de régulation des flux.

La longueur des réseaux de chauffage urbain est à titre d'exemple de 2 km à Ris-Orangis (2 128 équivalents-logements), de 13 km à Arcueil-Gentilly (10 000 équivalents-logements, 86 sous-stations), 31,6 km à Meaux (138 sous-stations), 70 km à l'Haÿ-les-Roses-Cheville-Larue-Villejuif (20 000 équivalents-logements, 150 sous-stations). Ce dernier est le plus grand réseau géothermique de France.

La centrale géothermique comprend des pompes de circulation de l'eau dans le circuit primaire, les tuyaux d'arrivée d'eau géothermale munis de filtres, le départ de l'eau refroidie, des indicateurs de température et de

débits dans le réseau, des systèmes de contrôle et de sécurité.

4-3.4. La cogénération

Elle consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Ceci implique que plusieurs systèmes de production d'énergie peuvent être utilisés, la centrale géothermique elle-même et, très souvent, une centrale à gaz alimentant une turbine ou un moteur à gaz qui peuvent produire à la fois de la chaleur et de l'électricité.

C'est le cas de la centrale de Chevilly-Larue où une turbine alimentée en gaz naturel est mise en route de novembre à mars pour assurer un complément de chaleur pendant les mois les plus froids. L'électricité produite est revendue à EDF et la chaleur produite par la combustion du gaz est récupérée et dirigée vers le réseau. Les deux centrales de cogénération du réseau de Chevilly-Larue et l'Haÿ-les-Roses représentent 35 % de la production annuelle de chaleur sur le réseau. En Île-de-France, 17 réseaux de chaleur géothermique sur 31 sont équipés de cogénération, soit moteur à gaz, soit turbine à gaz.

L'intérêt de ne pas dépasser 50 % de cogénération est d'ordre économique : contrairement aux énergies fossiles qui sont taxées à 20 % de TVA, l'énergie géothermique ne l'est qu'à 5,5 % à la condition qu'au moins 50 % de chaleur produite sur un réseau soit une énergie renouvelable.

4.4. Les difficultés rencontrées au cours de l'exploitation du Dogger

La première exploitation du Dogger a eu lieu, en 1963, à Carrières-sur-Seine, Yvelines, (1 585 m, 53 °C, 90 m³/h). La salinité de l'eau ayant interdit l'exploitation en puits unique avec rejet extérieur, l'opération fut abandonnée.

De 1976 à 1987, plus de 50 forages ont été effectués en région parisienne, mais une quinzaine d'installations géothermiques ont dû s'arrêter après trois à quinze ans de fonctionnement (figure 13).

Les difficultés rencontrées dans la géothermie du Dogger sont de plusieurs ordres, mais souvent liées à des raisons économiques. Certaines municipalités n'ont pu amortir les sommes engagées durant la période du contre-choc pétrolier de 1985-86 où le prix du pétrole brut a subi une baisse de moitié, le prix de l'énergie étant indexé sur celui du pétrole. À ceci peuvent s'ajouter des difficultés d'ordre technique. En effet, chaque forage est particulier et les débits obtenus, malgré les études préalables, ne sont pas toujours au niveau espéré. De plus, des problèmes de corrosion sont apparus à partir de 1987 dans de nombreux puits, qui n'ont pu être résolus qu'à partir de 1995.



Figure 13. Carte des installations géothermiques au Dogger en Région parisienne. (Document BRGM).

• La corrosion et le colmatage des puits

L'eau du Dogger est chargée de sels et de gaz agressifs vis-à-vis des tuyaux en acier, principalement d'hydrogène sulfuré, H_2S . Celui-ci est formé par des bactéries anaérobies capables de vivre dans les eaux profondes ; elles réduisent les sulfates, présents dans les eaux, en sulfures.

Par ailleurs, une corrosion galvanique induite par un effet de pile sur un acier insuffisamment homogène, entraîne la libération d'ions ferreux. Ces deux éléments contribuent à la formation de sulfure de fer qui précipite et peut obturer les tubages. La corrosion peut progresser par endroits de plus d'un millimètre par an et aboutir au percement du métal. La solution est venue d'une part de l'utilisation de tubages à double tuyauterie : extérieure en acier assurant la résistance mécanique, renfermant un deuxième tubage concentrique en matériau composite (résine époxy et fibre de verre) plus fragile mais résistant à la corrosion ; d'autre part, en utilisant des inhibiteurs de corrosion, antibactériens, et des inhibiteurs chimiques (amine grasse) permettant de constituer un film protecteur.

Ces dispositifs ont été appliqués lors de l'opération

de réhabilitation de l'installation de Melun-l'Almont en 1995.

Depuis cette opération, l'exploitation s'est poursuivie sans interruption et sans intervention. Récemment, à Chevilly-Larue et l'Hay-les-Roses (installations de 1985), la Semhach, Société d'économie mixte qui exploite le réseau de chaleur de ces deux villes, a réhabilité à titre préventif les deux doublets afin d'éviter l'entartrage des tuyaux et leur percement. Elle a choisi de rechemiser les tuyaux avec des tubages en fibre de verre sur les 2 000 m de longueur des forages. Ceci constitue une première technique en France pour la géothermie, le matériau étant cassant. Le dispositif devrait prolonger la durée de vie de l'exploitation de quinze à vingt ans.

• La percée thermique

À l'endroit du forage où l'eau est réinjectée, il se forme une zone froide qui diffuse peu à peu dans la nappe. Le temps que met ce front froid à parvenir au puits de production dépend de l'écartement entre la base des deux puits du doublet. Ce temps est calculé pour une durée de vie de trente ans (durée qui

correspond à la durée du permis initial), et on estime qu'une baisse de 3 à 5 °C se produit après ce temps, où l'exploitation cesse d'être rentable. La baisse de température autour des puits de la région parisienne limite donc le nombre de forages dans cette zone densément exploitée.

À Melun, Meaux, Ris-Orangis et dans d'autres villes où les puits étaient anciens, de nouveaux forages ont été effectués. On utilise en général l'ancien doublet en puits de réinjection, le nouveau forage servant à la production. Ceci constitue alors un triplet.

La présence des bulles froides oblige les opérateurs de géothermie à étudier attentivement l'implantation de nouveaux forages. Le Centre Technique Géothermique, créé en 2008, est chargé de réunir l'ensemble des informations sur ce sujet.

Les Journées de la géothermie 2016

Une preuve encore que la géothermie est bien un sujet de grande actualité, c'est la quatrième édition des Journées de la Géothermie qui sont organisées, au Palais des Congrès de Strasbourg, par l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), du 19 au 22 septembre 2016 ; elles rassembleront les acteurs francophones de la filière géothermique sur deux jours de conférences dédiées à chacune des trois filières françaises :

- la géothermie assistée par pompes à chaleur ;
- les réseaux de chaleur ;
- la géothermie profonde EGS et la géothermie volcanique, représentée essentiellement par le Cluster GEODEEP.

Les conférences de cette 4^e édition seront articulées de façon à rappeler les avantages de cette énergie renouvelable, **ses nouveaux défis, ses perspectives de développement en France et à l'export.**

De plus, un salon professionnel rassemblera une cinquantaine d'exposants à partir du mardi 20 septembre.

Le BRGM participe également à ces Journées de la géothermie. Les chercheurs du service géologique national seront présents et disponibles sur le stand du salon.

En 2016, la France accueille également l'*European Geothermal Congress (EGC)*, événement d'envergure européenne porté par l'*European Geothermal Energy Council (EGEC)*.

Ndlr. Comme annoncé dans notre éditorial, nous terminerons la publication de ce long et excellent article de nos confrères François Audubert et Roland Mahé-rault dans le numéro de *Saga Information* de novembre/décembre 2016.

Le Durandal, un biface sans équivalent dans l'Acheuléen mondial

Ludovic Greiling, membre de la SAGA.



Figure 1. Pointe exceptionnelle, longueur étonnante, matière première rare : le biface Durandal mesure 36 cm de long et date d'environ 580 000 ans.
Tenu en main par l'auteur.

Drôle d'outil, biface impressionnant...

C'est un objet archéologique rarissime qui a été sorti de la fameuse Caune de l'Arago, située près du village languedocien de Tautavel, en août 1997. Il est surnommé **Durandal**, du nom de l'épée du célèbre chevalier Roland qui mourut dans le col de Roncevaux, non loin de la commune.

Sa taille, 36 cm, en fait le plus grand biface trouvé à ce jour en Europe dans sa stratigraphie. Sa forme, une pointe d'une finesse rare, et sa matière, de la cornéenne, en font une pièce d'exception dans le monde.

C'est que le biface *Durandal* est vieux, très vieux. Il date d'un Pléistocène assez ancien. Le sol dans lequel il a été retrouvé est relativement bien estimé par différentes méthodes, aux alentours de 550 000 à 600 000 ans.

Pourquoi et comment les Acheuléens qui habitaient la grotte ont-ils conçu un tel objet ? Les spécialistes de