

Les isotopes dans l'exploration de l'énergie géothermique

par E. Barbier, M. Fanelli et R. Gonfiantini*

La publication de cet article sur l'énergie géothermique étonnera peu-être de nombreux lecteurs du Bulletin de l'Agence qui est d'ordinaire consacré aux problèmes de l'énergie nucléaire. Que peuvent apporter les techniques isotopiques à la mise en valeur et à l'exploitation de cette forme d'énergie qui ne représente qu'une part minime de l'énergie actuellement produite dans le monde? Le présent article s'efforce d'expliquer brièvement comment se forme l'énergie géothermique et le rôle des recherches isotopiques dans l'exploration géothermique, qui ne représente en fait qu'une seule partie de la vaste gamme des applications isotopiques en hydrologie, en géochimie et en géologie.

L'avenir de l'énergie géothermique pose des questions auxquelles il n'est pas facile de répondre. Il est certain que jusqu'ici seuls les champs géothermiques les plus accessibles ont été exploités de même qu'il est certain que, dans un avenir proche, les ressources géothermiques peuvent acquérir de l'importance pour le développement industriel et social de nombreuses régions de pays en développement. Toutefois, l'attrait particulier de l'énergie géothermique vient du fait que sa source essentielle est pratiquement infinie puisqu'il s'agit de la chaleur interne de la terre. L'enjeu est donc de savoir comment exploiter ne serait-ce que la lointaine périphérie de cet immense réservoir d'énergie affluente.

La chaleur des profondeurs de la terre

Depuis le dix-huitième siècle, on sait par des mesures effectuées dans les mines, que la température s'accroît avec la profondeur, en d'autres termes, qu'il existe un courant continu de chaleur qui monte de l'intérieur de la terre vers la surface. Le gradient moyen de température est de 3°C par 100 mètres de profondeur.

En partant de la surface, la terre est formée en gros de trois couches: la croûte, le manteau et le noyau métallique. La croûte, principalement composée dans sa partie supérieure de granites et dans sa partie inférieure de basaltes, a une épaisseur d'environ 35 kilomètres sous les continents et de 5 kilomètres seulement sous les océans où elle est formée principalement de roches basaltiques. La croûte flotte sur la partie supérieure de matériaux plus denses et plus plastiques de type péridotite qui constituent le manteau dont

l'épaisseur est de 2900 kilomètres. La croûte est partagée en six plaques principales qui se déplacent les unes par rapport aux autres.

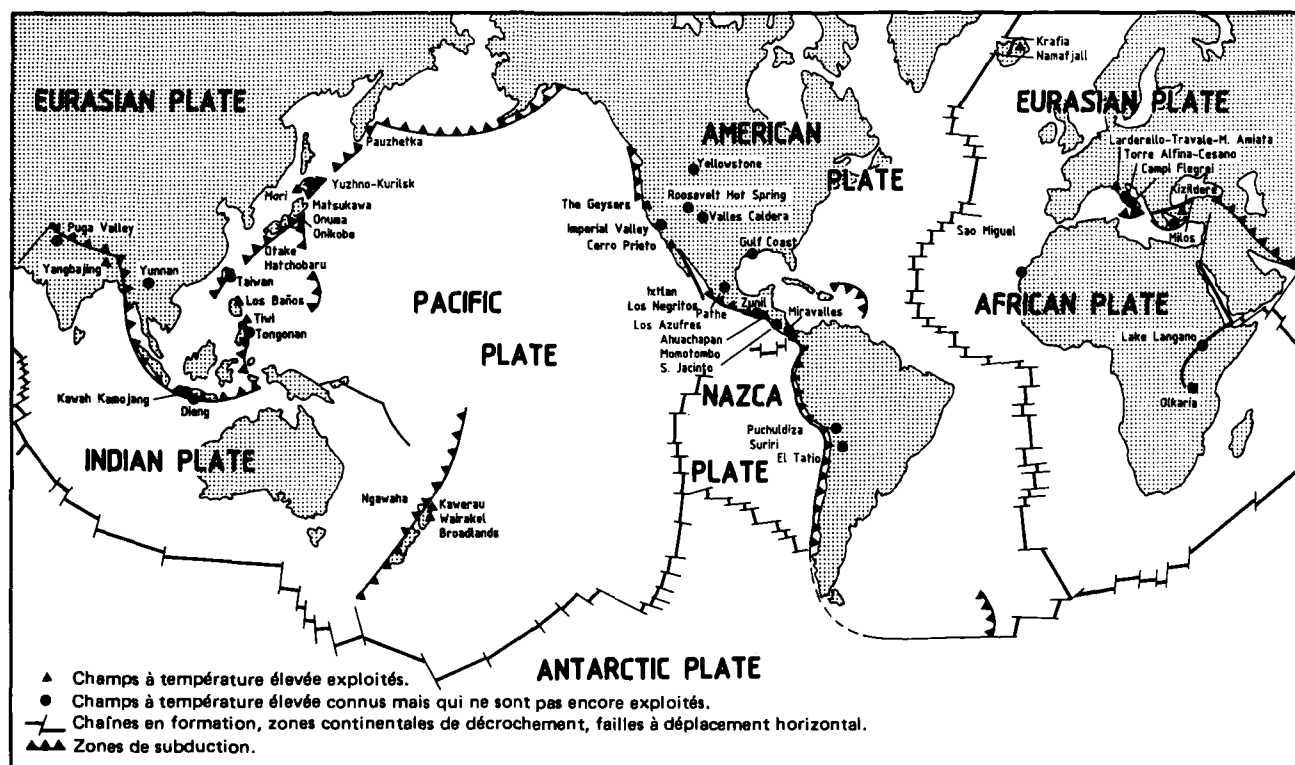
Les matériaux du manteau montent en surface le long des chaînes dites médio-océaniques en formation, provoquant ainsi la croissance des plaques adjacentes. En conséquence, ces plaques s'éloignent les unes des autres au rythme de 2 à 20 centimètres par an. En termes géologiques, c'est là une vitesse considérable. Pour compenser cette croissance, il existe d'autres zones, appelées zones de subduction, où une plaque plonge sous la plaque voisine, dans le manteau. Ces zones correspondent souvent à des fosses océaniques qui sont bordées par des arcs insulaires ou par des chaînes de montagne le long des littoraux. C'est en général dans les chaînes médio-océaniques en formation et dans les zones de subduction que se produisent les phénomènes de montée en surface de la chaleur interne de la terre et se situent la plupart des volcans et la plupart des champs géothermiques du monde.

Les champs géothermiques

Les champs géothermiques sont des zones dans lesquelles la température des eaux souterraines est très supérieure à la normale et dont les eaux peuvent être exploitées à des fins diverses, par exemple, pour le chauffage et la production d'électricité (au dessus de 150°C). Les sources chaudes sont des intrusions de magma à des profondeurs de 7 à 15 km et, là où la croûte de la terre est plus mince, dans l'épaisseur même du manteau. La chaleur est transférée dans les régions de la subsurface d'abord par conduction puis par convection des eaux souterraines. Des roches imperméables recouvrent les formations perméables qui contiennent l'eau très chaude (appelées réservoir géothermique), ce qui empêche ou limite les pertes de chaleur et maintient le fluide chaud sous pression. En pratiquant des forages jusqu'au réservoir géothermique, on peut extraire et exploiter le fluide chaud.

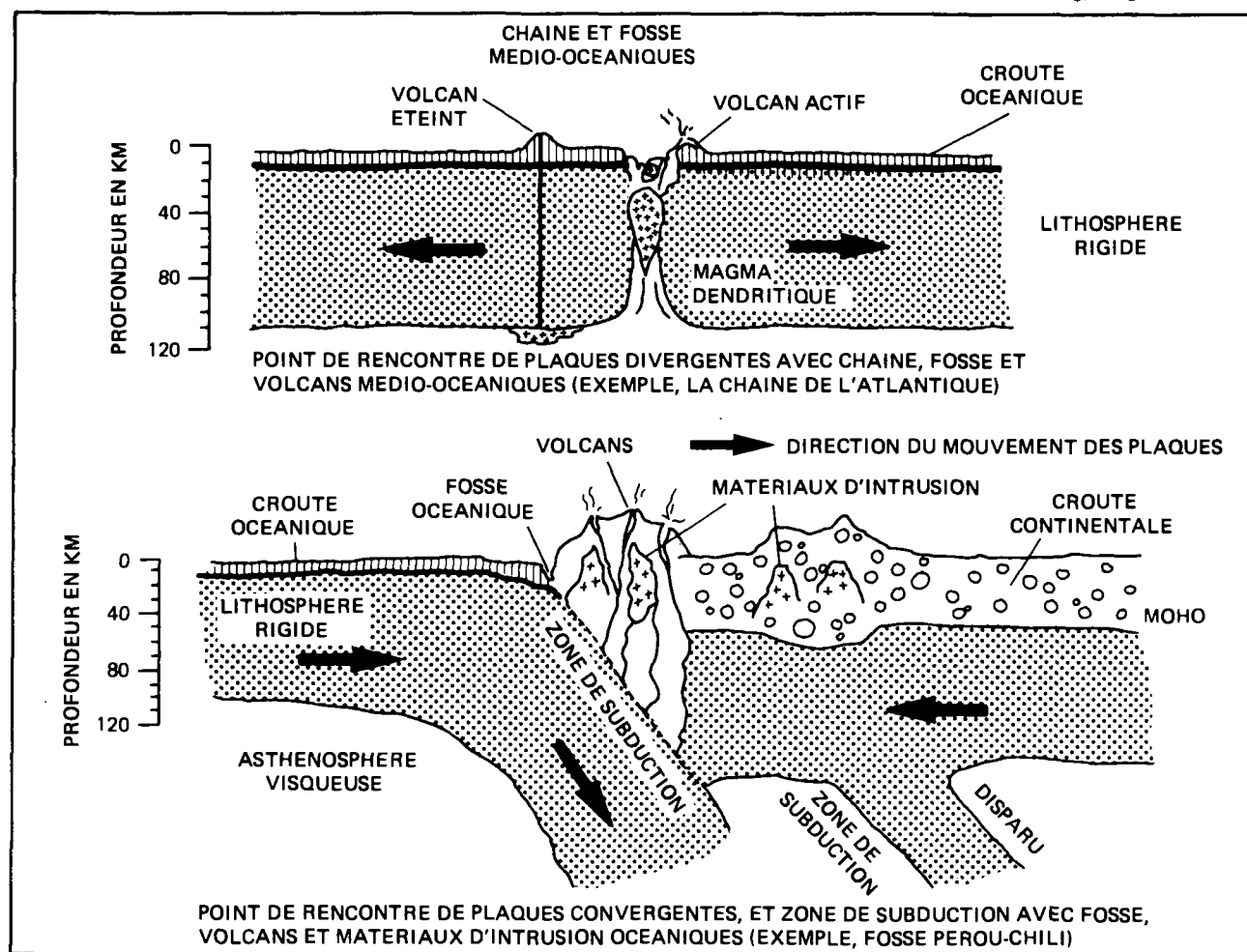
Lorsque les conditions sont particulièrement favorables, la vapeur sèche surchauffée peut être obtenue à une température qui dépasse souvent 250°C. Celle-ci peut être directement transportée jusqu'aux turbines pour actionner les alternateurs et produire de l'électricité. Cette production d'électricité géothermique est de tous les moyens connus de production d'énergie électrique celui qui est le moins coûteux. Les champs de Larderello et de Monte Amiata (Italie), Les Geysers (Californie, Etats-Unis d'Amérique) et Matsukawa (Japon) en sont des exemples.

* MM. Barbier et Fanelli travaillent à l'Istituto Internazionale per la Ricerca Geotermica, Via del Buongusto 1, 56 100 Pise (Italie). M. Gonfiantini est membre de la Section d'hydrologie isotopique de la Division de la recherche et des laboratoires de l'Agence.



Carte indiquant l'emplacement de la plupart des champs géothermiques reconnus. Ces champs sont situés le long des chaînes en formation et des failles continentales, et en particulier le long des zones de subduction.

Représentation schématique d'une chaîne en formation médio-océanique et d'une zone de subduction. (Geoth. Energy Mag. Février 1976)



Les champs géothermiques qui produisent un mélange de vapeur et d'eau très chaude sont moins favorables mais demeurent rentables pour la production d'énergie électrique. Dans ce cas, il faut séparer l'eau de la vapeur avant d'envoyer celle-ci dans les turbines. Wairakei (Nouvelle-Zélande), Cerro Prieto (Mexique) et d'autres champs géothermiques au Japon, aux Philippines et ailleurs sont des exemples de cette deuxième catégorie. L'eau chaude contient en général de fortes quantités de sels dissous qui peuvent susciter des problèmes de corrosion et d'incrustation.

Lorsque la température de l'eau souterraine ne se situe qu'entre 50 et 100 °C, l'eau est utilisée principalement pour le chauffage (immeubles d'habitation, serres, etc.), par exemple en Chine, en Islande, en Hongrie, en France, en URSS et dans de nombreux autres pays. Une autre utilisation est celle des sources thermales et médicinales.

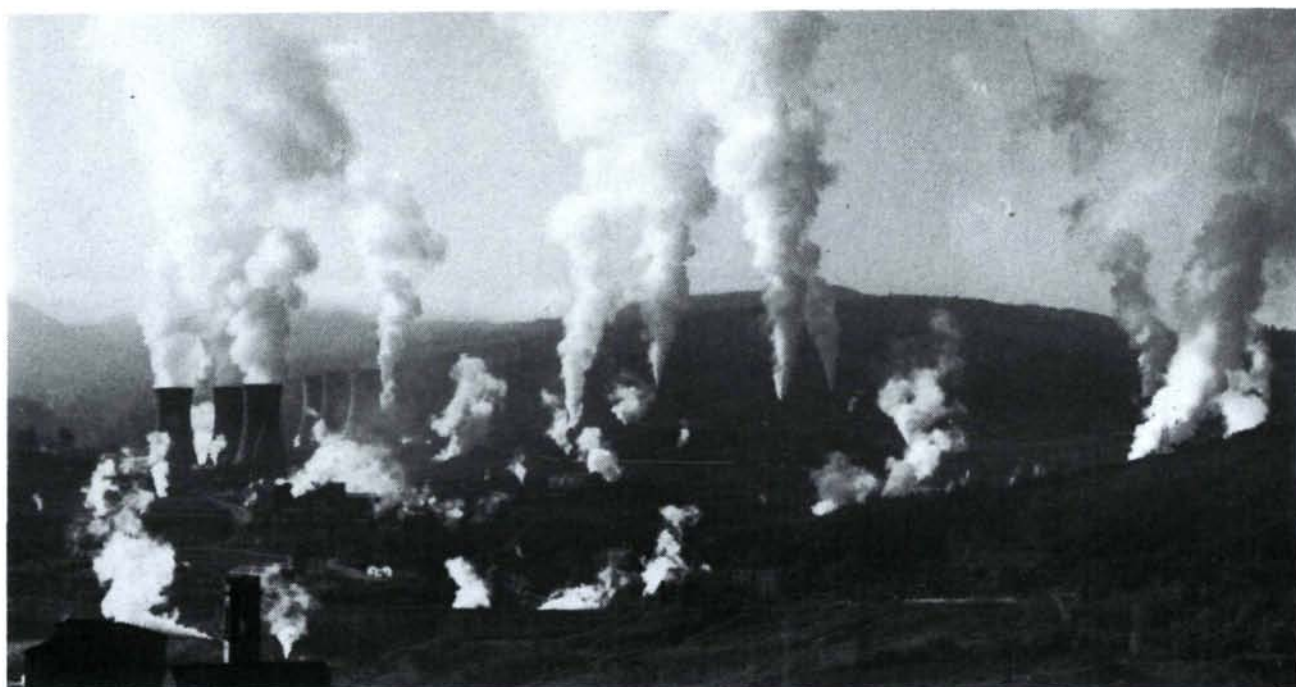
Les usines géothermiques qui fonctionnent actuellement dans le monde ont une puissance installée totale de quelque 2700 MWe seulement (voir le tableau), ce qui correspond par exemple à environ 2% de la capacité mondiale totale des centrales nucléaires. Toutefois, à cette capacité il convient d'ajouter les utilisations non électriques de l'énergie géothermique. De plus, il existe un certain nombre de champs géothermiques déjà reconnus qui seront exploités dans les années 80 et qui se trouvent dans les pays suivants: Chili, Grèce, Guatemala, Inde, Nicaragua et Antilles (France). L'exploration des ressources géothermiques est en cours dans de nombreux autres pays et des résultats encourageants ont été obtenus, tout particulièrement en Argentine, en Bolivie, en Bulgarie, en Colombie, au Costa Rica, à

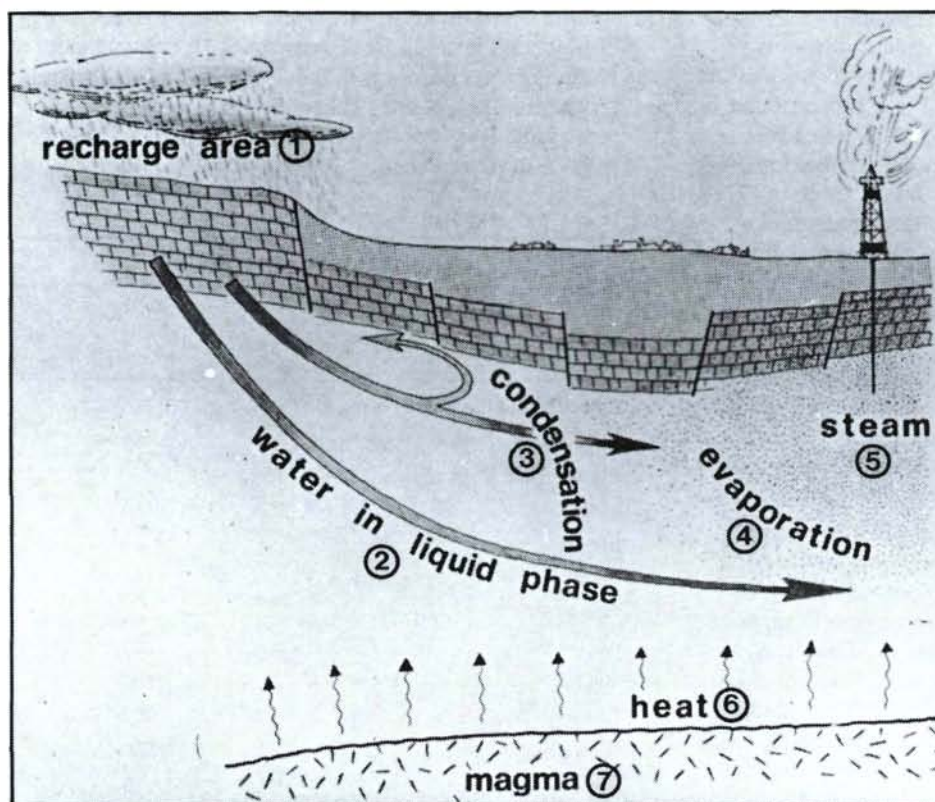
Djibouti, en Equateur, En Espagne (Iles Canaries), en Ethiopie, en Iran, en Israël, au Pérou, en Pologne et en Thaïlande. La production d'énergie électrique d'origine géothermique répondra peut-être dans l'avenir à une part appréciable des besoins énergétiques de nombreux pays en développement.

Les centrales géothermiques dans le monde

Pays	Puissance installée en 1982 (MWe)
Chine, République populaire de	4
El Salvador	95
Etats-Unis d'Amérique	936
Indonésie	30
Islande	41
Italie	440
Japon	174,5
Kenya	30
Mexique	180
Nouvelle-Zélande	202
Philippines	570
Portugal (les Azores)	3
Turquie	0,5
URSS	11
Total	2717

Le champ géothermique de Larderello en Toscane (Italie) tel qu'on le voit du village de Montercerboli. Il se caractérise par les tours de refroidissement des centrales géothermiques et par les panaches de vapeur sortant des puits de rejet dans l'atmosphère. Le nom du village vient du latin *Mons Cerberi* «La Montagne de Cerbère», le chien à trois têtes qui gardait l'enfer. A dire vrai, l'enfer devait sembler bien proche aux premiers habitants de la région. Les sources et fumerolles sulfureuses chaudes ont pour la plupart disparu avec l'exploitation intensive des champs géothermiques.

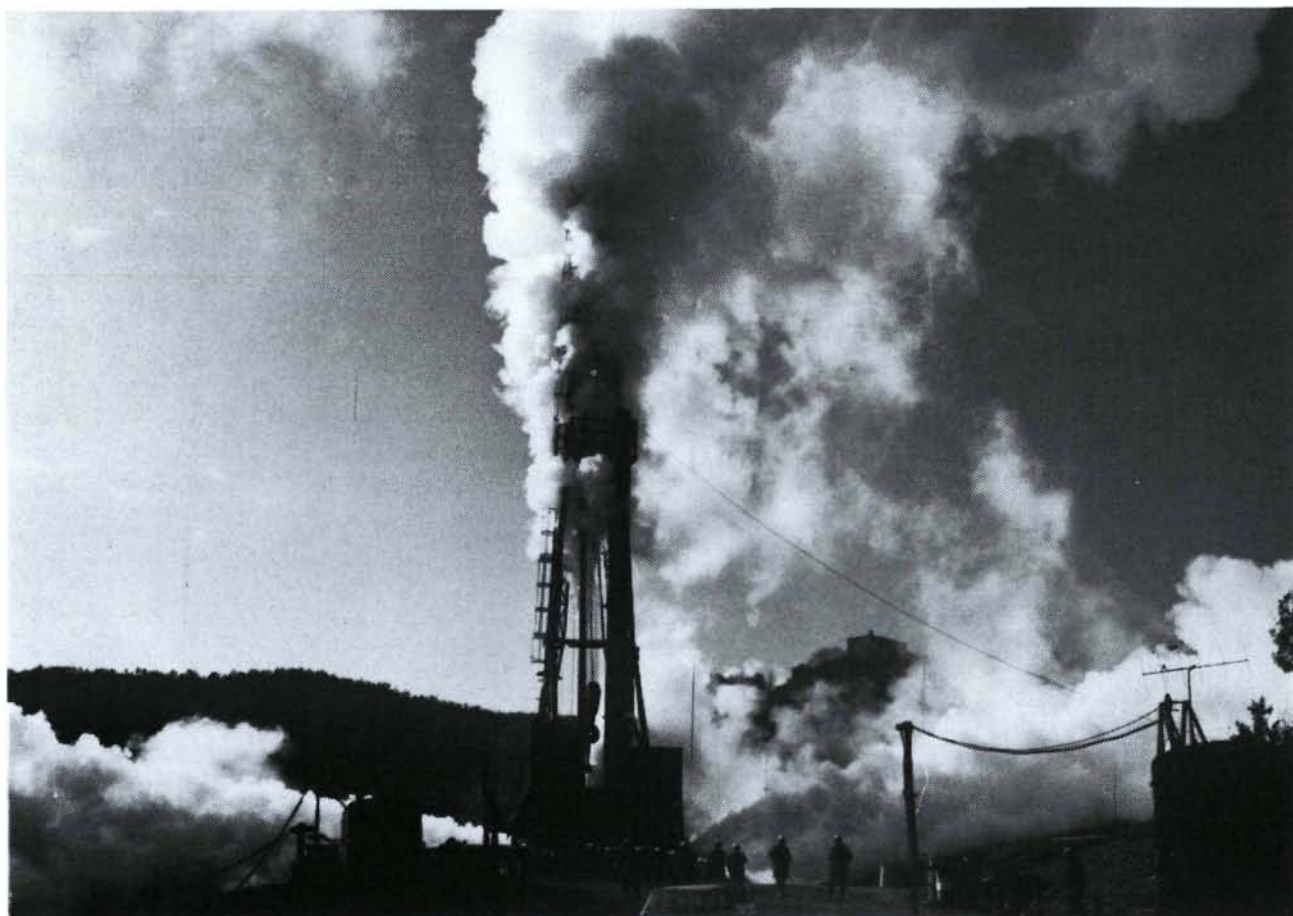




- ① zone de recharge
- ② eau en phase liquide
- ③ condensation
- ④ évaporation
- ⑤ vapeur
- ⑥ chaleur
- ⑦ magma

Représentation schématique d'un champ géothermique.

Un puits de production de vapeur à Larderello (Italie) au moment de son éruption, lorsque le réservoir géothermique est atteint. Ce puits a été creusé en janvier 1972 et a produit 326 tonnes/heure de vapeur surchauffée à 184°C et à 8 atmosphères. Le taux de production d'un puits tend à diminuer lentement avec le temps.



On espère qu'il sera possible plus tard d'extraire la chaleur interne de la terre provenant de formations de plus en plus profondes et, en particulier, de roches chaudes profondes à la fois compactes et sèches. Dans ce cas on doit forer deux puits que l'on reliera en profondeur par un réseau de fracturations hydrauliques artificiellement créées. De l'eau froide doit être injectée dans l'un des puits et de l'eau chaude sera récupérée dans l'autre. Des expériences préliminaires faites à 3000 m de profondeur à Los Alamos, Nouveau-Mexique (Etats-Unis), ont montré que ces projets sont exploitables. Les expériences se poursuivent aux Etats-Unis et d'autres sont en cours au Royaume-Uni (Cornouailles) afin de mettre au point et de perfectionner les techniques appropriées.

Les isotopes naturels: outils de prospection géothermique

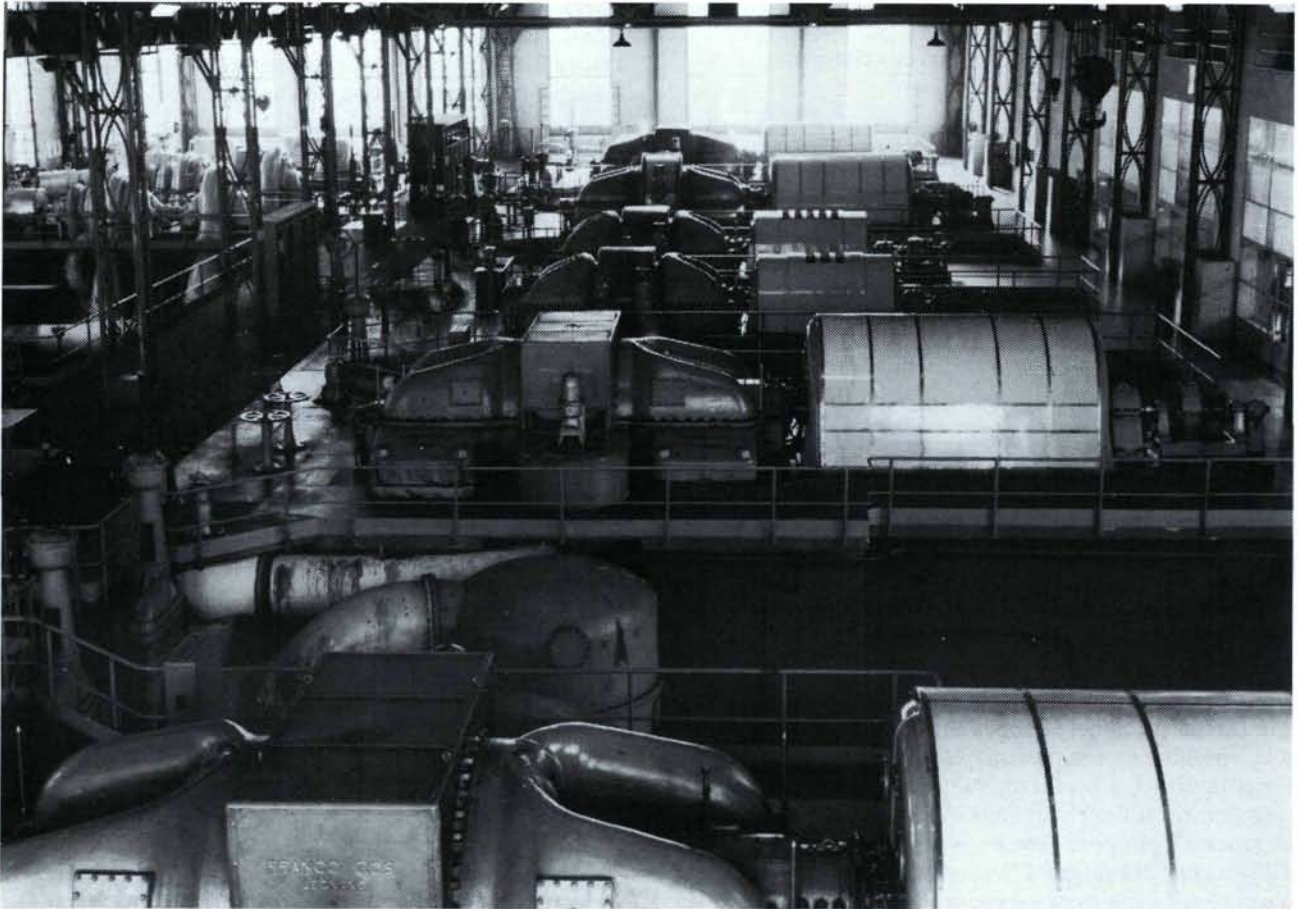
L'eau est le premier composant du fluide géothermique et est également le principal transporteur d'énergie puisqu'elle a une capacité de chaleur et une chaleur latente de vaporisation élevées. Les autres éléments gazeux associés à la phase de vaporisation d'un fluide

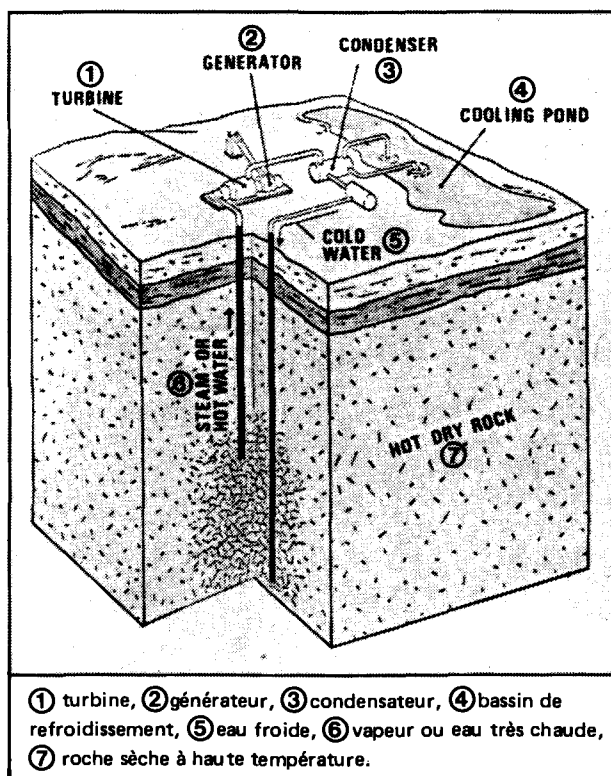
géothermique sont l'acide carbonique (0,5 à 5%), le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, l'azote, le méthane, l'hydrogène (globalement, jusqu'à 2 ou 3%), l'acide borique et les gaz rares.

La première contribution que les techniques isotopiques ont apporté à une bonne appréhension des champs géothermiques a été de démontrer que l'eau chaude et la vapeur proviennent des eaux de pluie qui s'infiltrèrent à partir des affleurements des formations géologiques qui constituent le réservoir géothermique. Bien que cette hypothèse nous apparaisse aujourd'hui assez banale, elle était loin de faire l'unanimité il y a une trentaine d'années, avant qu'elle n'ait été définitivement vérifiée par les mesures de la teneur en deutérium et en oxygène 18. Les scientifiques croyaient précédemment que la vapeur géothermique était d'origine juvénile, c'est-à-dire qu'elle provenait de l'intérieur de la terre et apparaissait donc pour la première fois en surface.

Les mesures isotopiques, surtout lorsqu'elles sont effectuées parallèlement à des analyses géochimiques classiques, donnent des renseignements sur les caractéristiques des champs géothermiques, par exemple, sur le

Intérieur d'une centrale géothermique à Larderello (Italie). Larderello, situé à 65 km au sud-ouest de Florence, a été le premier champ géothermique exploité dans le monde. En 1827, Francesco de Larderello, ancien officier de l'armée de Napoléon qui avait émigré en Toscane (il était né à Vienne, en Dauphiné), eut l'idée d'exploiter les eaux géothermiques – il les faisait évaporer partiellement pour en extraire l'acide borique. Le site fut plus tard appelé Larderello en son honneur. En 1904, de l'électricité a été produite pour la première fois à partir de la vapeur géothermique à l'aide d'un petit turbo-générateur; une année plus tard, on installa une centrale de vingt kilowatts. La production d'énergie électrique à partir des ressources du champ géothermique le plus grand qui soit connu au monde, les Geysers de Californie (Etats-Unis), n'a commencé qu'en 1960, bien que le premier puits de prospection ait été foré en 1921. (Photo ENEL, Italie)





Représentation schématique d'un champ géothermique artificiel. Les deux puits sont reliés en profondeur par un réseau de fracturations hydrauliques artificiellement créé dans la roche initialement compacte, sèche et très chaude. L'eau froide est injectée dans l'un des puits alors que la vapeur est récupérée dans l'autre. Une expérience préliminaire de ce type a été menée avec succès à Los Alamos (Nouveau-Mexique, Etats-Unis) à une profondeur de 3000 mètres, et les fractures ont été provoquées en injectant de l'eau sous pression. Une expérience semblable est en cours à une profondeur de 4000 mètres.

mélange entre des eaux de températures et d'origines différentes, sur les réseaux d'écoulement souterrain des fluides très chauds, sur le degré d'interaction avec les roches du réservoir, sur l'origine des divers constituants du fluide, etc. Mais l'application principale des techniques isotopiques dans la prospection géothermique est probablement l'estimation des températures en profondeur. Ce paramètre est en général difficile à obtenir mais il est essentiel pour évaluer le potentiel des champs géothermiques. En particulier, l'emploi des isotopes est extrêmement précieux lors de l'exploration géochimique préliminaire de ces champs. Lorsque les forages n'ont pas encore été effectués, des échantillons sont prélevés sur les sources, les geysers et les mofettes. Leur emploi est également précieux lorsque les sondages n'atteignent pas encore une profondeur satisfaisante ou sont en nombre insuffisant.

Les géothermomètres isotopiques exploitent le fait que la répartition des isotopes entre les deux composants d'un équilibre thermodynamique ne dépend que de la température. Les géothermomètres isotopiques les plus couramment utilisés sont ceux qui font appel aux isotopes d'hydrogène dans les systèmes méthane/gaz d'hydrogène et eau/gaz d'hydrogène, aux isotopes d'oxygène dans le système eau/sulfate dissous et aux

isotopes de carbone dans le système gaz carbonique/méthane.

On a également mis au point des thermomètres géochimiques fondés sur la teneur en silice des eaux chaudes ou sur les concentrations relatives de sodium, de potassium et de calcium, ou encore sur la composition au stade gaz-vapeur. Tous ces géothermomètres, y compris les thermomètres isotopiques, sont affectés, à des degrés divers, par les phénomènes qui se manifestent durant la montée vers la surface des fluides géothermiques comme, par exemple, les processus de mélange, les pertes par évaporation, les interactions avec les roches rencontrées, le rééquilibrage partiel à basse température, etc. Cependant, l'emploi simultané d'un nombre aussi élevé que possible de géothermomètres permet de calculer les éléments correctifs et d'arriver au juste résultat.

Le tritium a été utilisé pour déterminer la présence d'eau récente dans des fluides géothermiques. Comme l'on sait, de grandes quantités de tritium ont été injectées dans le cycle hydrologique, surtout pendant la période 1952 à 1962, au cours d'essais thermonucléaires atmosphériques. Cette substance peut donc être utilisée pour évaluer les mélanges d'eaux souterraines peu profondes et pour suivre les réseaux d'arrivée et d'écoulement des apports d'eaux nouvelles provenant des bords des champs géothermiques.

Récemment, des isotopes ont été utilisés pour suivre l'évolution de fluides géothermiques réinjectés. C'est là une application nouvelle et intéressante qui découle des efforts déployés pour réduire les effets sur l'environnement des fluides géothermiques: au lieu d'être déversés, après exploitation, dans les eaux de surface, les fluides sont réinjectés dans le champ géothermique et «recyclés», et pourraient, entre autres choses, contribuer à augmenter la production du champ.

Activités de l'Agence

Les activités de l'Agence dans l'application des techniques isotopiques à l'exploration des ressources géothermiques sont menées par la Section de l'hydrologie isotopique de la Division de la recherche et des laboratoires. La Section participe à des activités d'exploration actuellement en cours au Costa Rica, en Inde, au Mexique et en Thaïlande. D'autres projets seront éventuellement inclus dans un programme de recherche coordonnée sur l'application des techniques isotopiques à l'hydrologie et à la géothermie en Amérique latine, financé par le Gouvernement de la République fédérale d'Allemagne et exécuté par l'Agence. Le programme en est actuellement à sa phase préparatoire et les travaux sur le terrain commenceront probablement vers la fin de l'année.

L'Agence a organisé, il y a un certain temps (novembre 1981), une réunion de consultants sur l'application des techniques isotopiques aux réalisations géothermiques. Le compte rendu de cette réunion sera publié dans une édition spéciale du journal géothermique.

Enfin, il convient de mentionner la coopération permanente qui existe entre l'Agence et l'Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Pise (Italie), et avec le Département de la recherche scientifique et industrielle, Petone and Lower Hutt (Nouvelle-Zélande).