La ressource géothermique française

Utilisation et perspectives

The french geothermal resource Utilization and prospects

J.C. Vathaire

Directeur technique de GEOTHERMA

Suscitée en 1974 par la crise de l'énergie et intensifiée à partir de 1979, en Ile-de-France et en Aquitaine, l'exploitation de la ressource géothermique est en bonne voie : 60 forages réalisés, dont 40 en exploitation, qui permettent de chauffer plus de 600 000 personnes, d'économiser 150 000 tonnes de pétrole par an, et correspondent environ au quart du potentiel économiquement disponible.

Ce développement classe actuellement la France au 1^{er} rang mondial pour l'utilisation de l'énergie géothermique basse température, et constitue une technologie dès à présent exportable (chiffre d'affaires actuel de plus d'un milliard de francs)

Spurred in 1974 by the energy crisis and intensified after 1979 in the Ile de France and Aquitaine regions, exploitation of the geothermal resource is progressing satisfactorily : 60 drill holes made, including 40 in exploitation, providing heating for more than 600,000 persons, allowing an annual savings of 150,000 metric tons of oil, and corresponding to approximately a quarter of the economically available potential. This development makes France the world leader for use of low temperature geothermal power and is already an exportable technology (current turnover more than one billion French francs).

En 1974, l'énergie géothermique est apparue aux yeux des géologues français comme une des formes d'énergie susceptible d'être rapidement utilisable pour pallier la première crise du pétrole.

L'utilisation thermique des sources chaudes remonte à la plus haute antiquité, et les premières applications industrielles sont apparues au début de ce siècle, en Hongrie pour la production de chaleur et en Italie pour la production d'électricité. En 1974, près de 40 pays recouraient à ce type d'énergie, essentiellement pour la production d'électricité, à partir de gîtes de vapeur à haute température.

La France métropolitaine est dépourvue de telles ressources, mais elle dispose de vastes bassins sédimentaires recelant des aquifères profonds, essentiellement connus grâce aux travaux de recherche pétrolière. Ainsi, la première expérience était tentée en 1964 au forage de Carrières-sur-Seine, au nord-ouest de Paris, par la C.E.P. (Compagnie d'Exploration Pétrolière), maintenant re-

groupée au sein de ELF-ERAP. Mais la minéralisation importante des eaux du Dogger (de 10 à 15 g/l) avait alors découragé les futurs utilisateurs.

Le mérite de « l'invention » du dispositif d'exploitation de telles eaux, le doublet, revient à un ingénieur pétrolier, Pierre Maugis, qui, à la suite de l'expérience de Carrières, imagina de réinjecter l'eau, permettant ainsi, après épuisement calorifique par échange, d'éviter le rejet en surface d'une eau fortement minéralisée, et de maintenir la pression du gisement. Cette conception devait aboutir à la réalisation, en 1969 à Melun l'Almont au sud-est de Paris, du premier doublet géothermique permettant d'assurer une part importante du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire de plus de 2 500 logements collectifs, à partir d'eaux à basse température (72 °C) issues de la nappe du Dogger, à 1 700 mètres de profondeur. Cette installation est maintenant en exploitation depuis 14 ans et permet d'économiser 1 500 TEP (tonnes d'équivalent-pétrole) par an.

LA HOUILLE BLANCHE/N°3/4-1985

S'appuyant sur cette première expérience et sur les données acquises par les géologues grâce aux travaux de recherche pétrolière, le gouvernement français décidait, dès 1974, d'utiliser l'énergie géothermique de nos aquifères profonds. L'objectif fixé début 1975 était de 500 doublets à réaliser d'ici 1985 pour assurer le chauffage d'un million de logements. Fin 1984, 50 installations sont en exploitation, économisant annuellement 180 000 TEP. Une vingtaine d'autres sont en cours d'équipement ou de réalisation.

Un certain nombre d'obstacles ont entravé le développement de cette énergie, les uns économiques, les autres techniques.

Obstacles économiques, car le coût d'investissement initial reste élevé (de 40 à 50 millions de Francs) par rapport à la mise en œuvre d'autres énergies. Un tel investissement, qui comporte une préférence du long terme (économies de combustible) sur le court terme (investissements) est fortement dépendant des taux d'intérêt (14 % en moyenne) et du prix des énergies de référence (sous-évalué pour certaines). Or, à la différence des secteurs traditionnels de l'énergie, en géothermie les investissements de production et de distribution sont à la charge directe des décideurs (en général collectivités locales). Si un tel dispositif est particulièrement avantageux pour l'usager, il pèse particulièrement lourd dans les programmes d'investissements des collectivités locales.

Et l'on voit ainsi trois étapes dans le développement de cette énergie en France :

- de 1974 à 1979 : 5 opérations seulement seront réalisées alors que le coût du pétrole en Francs constants, après une brusque hausse en 1974, redevient stable, sinon régresse,
- de 1979 à 1983 : 35 opérations engagées, réalisées et mises en exploitation, après le deuxième choc pétrolier et l'envolée des prix,
- en 1983 et 1984 : ralentissement de l'activité face à une relative surabondance énergétique, à une régression des coûts de l'énergie et aux difficultés de financement des collectivités locales.

Obstacles techniques, car deux contraintes conditionnent essentiellement l'utilisation de cette énergie. La première est due au fait que le marché de la chaleur géothermique est un marché captif. Celle-ci ne peut être utilisée que sur place, à la différence des ressources minières classiques. La faisabilité économique d'une exploitation géothermique dépendra donc à la fois des caractéristiques de la ressource (débit, température) et de celles de l'habitat consommateur. Ce sont généralement ces dernières qui sont le plus critiques (densité et quantité des logements raccordés, mode de chauffage ou type d'émetteur, type d'énergie substituée).

Les grands inventaires entrepris dès 1975 (Bassin Parisien, Bassin Aquitain, Alsace) ne s'intéressaient primitivement qu'à la ressource. Rapidement, on dut y adjoindre un recensement détaillé des utilisateurs (inventaires départementaux).

La deuxième contrainte est apparue au cours des explorations menées dans les différents bassins sédimentaires français : l'existence d'une ressource géothermique

basse température suppose des conditions hydrogéologiques très favorables (formations à très forte perméabilité : fissurées, fracturées karstifiées, ou à perméabilité moyenne mais épaisseur productive importante) compte-tenu des débits importants recherchés (150 à 300 m³/h). De plus, il est apparu des difficultés techniques provisoirement insurmontables lors de la réinjection de débits importants (supérieurs à 100 m³/h) dans les formations détritiques, sableuses ou gréseuses (Trias région parisienne, Orléanais). Actuellement, ne sont exploités en doublet (avec réinjection) que les réservoirs calcaires, et en puits unique (sans réinjection) des formations calcaires et des formations sableuses ou gréseuses. Les ressources géothermiques apparaissent maintenant plus localisées qu'on ne le supposait au départ. Elles constituent à ce titre de véritables gisements miniers.

Comment se répartissent ces gisements sur le territoire français ? Essentiellement dans les deux plus grands bassins sédimentaires : le Bassin Parisien et le Bassin Aquitain.

Dans le *Bassin Parisien*, l'essentiel des opérations exploitent les calcaires du Dogger. Cette formation, remarquablement régulière, constitue un réservoir particulièrement favorable à l'exploitation géothermique : la température des eaux varie en région parisienne de 55 à 70 °C et atteint 85 °C dans la zone la plus profonde du Bassin, pour des profondeurs variant de 1 400 à 1 900 mètres. Les débits peuvent être très importants (supérieurs à 200 m³/h) dans toute la partie centrale du Bassin, axée sur la Brie, sur une superficie de plus de 9 000 km². Ils sont encore importants (supérieurs à 120 m³/h) sur près de 8 000 km². A la périphérie, la productivité est nettement moins importante, et la température plus faible en raison de la profondeur moindre de cette formation.

L'eau contenue dans ces calcaires est salée, la salinité variant de 5 à 30 g/l, les eaux les plus minéralisées se situant au centre et au nord-ouest du bassin.

L'essentiel de l'agglomération parisienne et de sa couronne est situé à l'aplomb de cette ressource, ainsi qu'un certain nombre de villes importantes telles que Creil, Meaux, Melun ou Fontainebleau. Actuellement, 41 opérations sont en exploitation ou sur le point d'être exploitées sur cet aquifère, représentant plus de 125 000 équivalents-logements raccordés et plus de 120 000 TEP économisés.

Outre le Dogger, d'autres aquifères sont exploités par quelques opérations. En particulier, la partie inférieure du Crétacé comporte deux importants niveaux sableux, l'Albien et le Néocomien, le premier étant exploité pour l'alimentation en eau potable en région parisienne depuis 1941. De nombreux ouvrages exploitent cette nappe, parfois à des débits supérieurs à 200 m³/h. Le seul puits réalisé à des fins géothermiques est celui destiné au chauffage de la Maison de la Radio (1960). Des sables de l'Albien sont présents sur une vaste étendue au centre du Bassin Parisien, la température des eaux oscillant entre 20 et 30 °C suivant la profondeur de la nappe. Depuis 1935, cette nappe est protégée afin d'éviter sa surexploitation.

Situés 150 mètres au-dessous de l'Albien, les sables du Néocomien constituent un objectif important sur une grande étendue du Bassin Parisien, la température des

AQUIFÈRE GÉOTHERMIQUE DU DOGGER
DU BASSIN PARISIEN
TEMPÉRATURE ET PRODUCTIVITÉ

AQUIFÈRE GÉOTHERMIQUE DU NÉOCOMIEN
DU BASSIN PARISIEN
TEMPÉRATURE ET PRODUCTIVITÉ

eaux étant de l'ordre de 35 °C sous Paris et dépassant 50 °C dans la zone la plus profonde. Ce réservoir est actuellement exploité en un seul point, à Bruyères-le-Châtel pour le chauffage et l'alimentation en eau industrielle et domestique du Centre d'Etudes Atomiques. Bien qu'encore peu exploités, les sables du Néocomien constituent actuellement l'objectif de plusieurs projets, à la fois de chauffage et d'alimentation en eau en raison de la très faible minéralisation de cette eau.

Autre objectif potentiel, les formations du Lusitanien dont les variations de faciès sont nombreuses mais comportent essentiellement un réservoir calcaire apparemment favorable dans la zone centrale du Bassin Parisien, et un réservoir grés-argileux au nord d'une ligne Dreux-Paris-Reims. Situées 400 mètres plus haut que celles du Dogger, les eaux du Lusitanien oscillent entre 40 et 60 °C. Les caractéristiques et l'extension des réservoirs potentiels de cette formation sont encore mal connues. Un premier test, réalisé lors du forage au Dogger d'Orly, avait démontré une productivité supérieure à 150 m³/h. Une opération engagée à Provins a abouti à un échec. Des études d'évaluation sont en cours à la faveur des forages géothermiques au Dogger et des recherches de stockage souterrain de gaz.

Réservoir le plus profond du Bassin Parisien, les formations détritiques du Trias constituent des objectifs potentiels en plusieurs régions du Bassin Parisien. Il est aussi le principal objectif en région Centre. Il va ainsi être exploité à Châteauroux où ces formations, à une profondeur de 700 mètres, fournissent une eau à plus de 30 °C. Ces formations s'ennoient rapidement vers le nord, la température des eaux contenues pouvant dépasser 80 °C du cœur de la fosse de Sologne.

Autre région potentiellement intéressante pour l'exploitation du Trias, la Lorraine ne comporte pas encore d'exploitation à des fins géothermales.

En région parisienne, les formations détritiques du Trias peuvent constituer un objectif géothermique le long d'un axe centré sur la Basse Seine. Deux opérations ont jusqu'à présent tenté d'exploiter ces niveaux : la première à Cergy, la seconde à Achères. Dans les deux cas, il a été décidé de recourir à l'exploitation du Dogger après qu'il ait été constaté à Cergy que la productivité du réservoir était insuffisante, et à Achères que la réinjectivité était trop faible. La difficulté est analogue à celle rencontrée dans l'opération de Melleray (Saint-Denis-en-Val) près d'Orléans.

RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE
DU CENOMANO-TURONIEN DU BASSIN AQUITAIN
TEMPÉRATURE ET PRODUCTIVITÉ

RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE
DE L'EOCÈNE DU BASSIN AQUITAIN
TEMPÉRATURE ET PRODUCTIVITÉ

Compte tenu de ces difficultés, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie a décidé, courant 1983, de ne plus autoriser la réalisation de doublet au Trias avant que les problèmes d'injection ne soient résolus. En raison de l'importance du potentiel géothermique que représente le Trias pour la région parisienne, un important programme de recherches a été engagé par l'Institut Mixte de Recherches Géothermiques afin de déterminer les causes et les solutions à ces problèmes d'injection.

Les opérations déjà réalisées dans le Bassin Parisien se répartissent en 41 doublets au Dogger et 6 puits uniques (Albien, Néocomien, Lusitanien et Trias), soit au total 88 forages.

Le Bassin Aquitain constitue un bassin beaucoup plus complexe que le Bassin Parisien, à la fois par la variété de ses faciès et par sa structure tectonique profonde. Son sous-sol est riche en formation très perméables, karstifiées ou très fracturées. Les circulations y sont donc rapides, les eaux peu minéralisées et, de ce fait, n'exigent pas de forage de réinjection.

L'essentiel des opérations exploitent les eaux contenues dans les formations du Crétacé supérieur (Cénomaniens, Turonien). Dans les Landes, les forages de Dax et de Mont-de-Marsan exploitent les eaux des dolomies karstiques. Si ce type de formation est susceptible de produire

des débits importants (supérieurs à 200 m³/h), par contre leur mise en production n'est pas sans risque compte-tenu du caractère bien souvent localisé des phénomènes de karstification (difficultés de mise en production à Mont-de-Marsan II). En région bordelaise, les forages réalisés (Mériadeck, Benauges, Pessac) exploitent les eaux des réservoirs gréseux et carbonatés du Cénomaniens et de la base du Turonien. Depuis le nord de la région bordelaise jusqu'au sud des Landes, les réservoirs du Crétacé supérieur constituent un des principaux objectifs du Bassin Aquitain.

Une des autres formations aquifères essentielles pour la géothermie est constituée par les dépôts sableux et carbonatés de l'Eocène. Déjà exploitées par de nombreux captages pour l'eau potable, les eaux de ces formations sont exploitées pour la géothermie soit par des réalisations nouvelles (Toulouse-Blagnac, Lamazère), soit en profitant de captages anciens (Nogaro, etc.). Les formations de l'Eocène recouvrent pratiquement toute la superficie du Bassin Aquitain. Leur profondeur, peu importante dans le nord du Bassin, dépasse 1 000 mètres dans les parties sud et sud-est du Bassin, la température des eaux pouvant dépasser 50 °C. Malgré leur température peu élevée, les formations de l'Eocène constituent un objectif géothermique important étant donné leur faible minéralisation et l'excellente connaissance que les géologues en ont.

Autre aquifère exploité pour la géothermie, à Jonzac, les grès du Trias qui peuvent constituer un objectif intéressant dans la partie nord de l'Aquitaine, avec des températures oscillant entre 50 et 80 °C.

La série sédimentaire du Bassin Aquitain contient d'autres niveaux aquifères potentiellement intéressants pour l'exploitation géothermique, en particulier :

- les formations carbonatées ou détritiques du Paléocène et du Danien, localisées dans le sud du bassin, avec des températures pouvant atteindre 80 °C,
- les formations du Crétacé inférieur, carbonatées ou détritiques, exploitables à des températures supérieures à 80 °C, dans les bassins de Parentis, de l'Adour et dans le sud du bassin,
- les formations du Jurassique supérieur à moyen, exclusivement carbonatées et constituées essentiellement, dans les bassins de Parentis et de l'Adour, par la dolomie de Mano (Portlandien, Kimméridgien supérieur) avec des profondeurs généralement supérieures à 1 000 mètres, et, dans le secteur s'étendant d'Angoulême à Auch, par des calcaires (Kimméridgien, Dogger).

Ces formations, qui recèlent sans doute un important potentiel géothermique, sont encore mal connues et difficiles à évaluer.

D'autres bassins sédimentaires ont fait l'objet de recherches, d'inventaires, voire d'explorations jusqu'ici infructueuses.

Le premier étudié, après les bassins parisien et aquitain, a été l'Alsace, ou plus exactement le fossé rhénan, correspondant à un effondrement entre Vosges et Forêt Noire où l'on trouve, sous un épais remplissage de tertiaire et de quaternaire, une série sédimentaire analogue à celle du Bassin Parisien, du Trias au Jurassique. Si le gradient y est élevé (4 °C/100 m en moyenne), voire localement très élevé (10 °C/100 m), en contrepartie il y règne une tectonique intense compartimentant les aquifères potentiels et rendant leur localisation délicate.

Dans la partie nord, de Colmar à Strasbourg, deux formations peuvent constituer des objectifs potentiels. En premier lieu, la « grande oolithe », comparable au Dogger du Bassin Parisien; si la température des eaux peut dépasser 100 °C, par contre les productivités observées sont inférieures à celles obtenues dans le Bassin Parisien. En second lieu, les formations détritiques du Trias inférieur (Buntsandstein). Ce dernier aquifère était l'objectif du forage de Cronembourg, dans la banlieue de Strasbourg, qui constitue jusqu'à présent le seul forage géothermique réalisé, du côté français, dans le fossé rhénan. Ce forage, qui a atteint 3 400 mètres de profondeur, a mis en évidence des eaux dont la température dépassait 140 °C. Malheureusement, la productivité est restée très insuffisante.

Dans la partie sud (région de Mulhouse, Bâle), les calcaires du Jurassique supérieur peuvent constituer un objectif géothermique. Une opération est d'ailleurs envisagée à Mulhouse.

Autre fossé d'effondrement, la Limagne a fait très tôt l'objet d'une exploration basée sur des campagnes de recherches pétrolières antérieures. Si le gradient y est important (100 °C à 1 500 mètres de profondeur), les formations constituant l'objectif (grès du Stampien) pré-

LOCALISATION ET DÉFINITION DES RÉSERVOIRS GÉOTHERMIQUES DE LA FRANCE

BASSIN DE PARIS	BASSIN AQUITAIN	ALSACE	AUTRES RÉGIONS
ALBIEN jusqu'à plus de 40 °C, non pris en compte, protégé NEOCOMIEN jusqu'à plus de 40 °C, non pris en compte, étude en cours LUSITANIEN jusqu'à 1 500 m et 64 °C, centre du bassin potentiel intéressant, peu connu. DOGGER jusqu'à 1 800 m et 85 °C, centre du bassin aquifère profond le mieux connu, déjà exploité, objectif géothermique principal. TRIAS jusqu'à 1 900 m et 80 °C, Lorraine Orléanaise et région parisienne, objectif géothermique intéressant mais peu connu.	EOCÈNE jusqu'à 1 000 m et 50 °C étendu, bien connu PALÉOÈNE-DANIEN au Sud, jusqu'à 2 500 m et 80 °C mal connu et aléas (karst) CRÉTACÉ SUPÉRIEUR exploité à Dax et Mont-de-Marsan (dolomies karstifiées) et Bordeaux (sables) un des principaux objectifs du Bassin. CRÉTACÉ INFÉRIEUR de 2 000 m à 6 000 m, imbrication complexe d'aquifères JURASSIQUE SUP. et MOYEN important potentiel géothermique, mais absence d'informations précises sur la productivité. LIAS MOYEN objectif intéressant car température élevée, mais peu connu. LIAS INF. TRIAS objectif intéressant (80 °C) dans le Nord, mais peu connu.	MALM au sud, jusqu'à plus de 90 °C, peu connu et aléas (fractures) GRANDE OOLITHE jusqu'à 2 500 m et plus de 100 °C, au sud de Strasbourg, potentiel intéressant, mais peu connu aléatoire et peu étendu. MUSCHELKALK SUP. jusqu'à 2 300 m et 150 °C, très mal connu, objectif limité. BUNTSANDSTEIN jusqu'à 3 000 m et 150 °C, existe dans toute l'Alsace, objectif intéressant mais peu connu.	HAIGNAUT (Nord) objectif localisé, mais intéressant extension et caractéristique mal connues. POITOU-CHARENTE potentiel limité et peu connu. ALLIER potentiel faible, peu connu. FRANCHE COMTE potentiel limité, températures peu élevées, structure complexe. LANGUEDOC-ROUSSILLON géologie très complexe, peu connu. PROVENCE-CÔTE D'AZUR structure complexe risque important, peu connu. COULOIR RHODANNIEN potentiel limité, risque élevé CORSE p.m.

sentent une productivité insuffisante. Deux forages y ont été réalisés : Beaumont, dans la banlieue sud de Clermont-Ferrand, les Vergnes, en banlieue nord. Ce dernier puits est actuellement l'objet de mesures complémentaires.

Autre zone d'effondrement également, mais beaucoup plus complexe que les deux précédentes, le couloir rhodanien, qui a subi fortement les effets de la tectonique alpine durant le tertiaire. Trois forages d'exploration y ont été menés sur des formations susceptibles de constituer des réservoirs d'extension régionale appartenant au Jurassique moyen et supérieur. Il s'agit là de calcaires où la ressource géothermale est localisée en milieu fissuré karstique, pouvant constituer des réservoirs importants, mais où le risque d'échec à l'exploration est important.

A des degrés divers, les forages réalisés à Bourg-en-Bresse, Valence et Avignon n'ont pas permis de mettre en évidence des réseaux karstifiés suffisamment importants, les températures observées correspondant généralement aux prévisions.

Localement, d'autres formations pourraient constituer des objectifs, mais elles n'ont généralement qu'une faible extension et présentent un risque élevé à l'exploration.

Le Languedoc-Roussillon a également été l'objet d'un inventaire détaillé. Sa complexité structurale, l'absence de continuité des réservoirs rendent particulièrement difficile l'exploitation de cette région. Plusieurs forages y ont déjà été réalisés, mais aucun d'entre eux n'a pu être mis en exploitation.

Dans le secteur de Montpellier (30 °C, 500 mètres), les calcaires du Dogger ont fait l'objet de deux forages (Antigone, Bagatelle), mais la ressource s'est avérée insuffisante.

Dans le secteur de Sète, les calcaires karstiques du Jurassique supérieur ont été explorés. Il en est de même à Agde, où le forage entrepris n'a pu atteindre cet objectif à la profondeur escomptée.

Un certain nombre d'objectifs à Béziers, Perpignan, Carcassonne, et aussi en Camargue et autour de l'Etang de Berre, peuvent constituer des réservoirs potentiels mais qui, compte-tenu de la faible connaissance que l'on en a, nécessiteront une stratégie d'exploration adéquate.

La dernière région qui n'a fait l'objet d'aucune exploration à ce jour, du côté français, est la région Nord/Pas-de-Calais. Il y a là un réservoir aquifère dans les calcaires du Carbonifère, le long de la bordure nord du bassin houiller franco-belge, dont l'existence a été prouvée par deux forages géothermiques réalisés en territoire belge et qui ont fourni des débits artésiens supérieurs à 100 m³/h à une température de l'ordre de 70 °C. La prolongation de ce réservoir en territoire français peut être supposée. Son évaluation nécessiterait des travaux complémentaires.

Au total, à mi 1984, ce sont près de 110 forages géothermiques qui ont été réalisés, dont :

- 80 % en Bassin Parisien avec un taux de réussite de 96 %,
- 10 % en Bassin Aquitain avec un taux de réussite de 75 %,

— 10 % dans les autres bassins, sans résultat à ce jour.

Le secteur résidentiel, gros consommateur d'énergie, est à l'heure actuelle le secteur d'application de loin le plus important de la géothermie basse température. Les gammes de température utilisées sont très comparables à celles des ressources, les concentrations de logements sont à l'échelle des investissements nécessaires.

Le secteur tertiaire (équipements collectifs, sportifs, commerciaux, etc.) permet généralement l'utilisation optimale de la ressource géothermique.

Sur les 110 forages réalisés, il est frappant de constater que deux seulement, Melleray/Saint-Denis-en-Val et Lamazère, ont été réalisés pour le chauffage de serres, aucun pour le secteur industriel.

Ceci est révélateur des contraintes inhérentes à ce type d'énergie :

- conjoncture peu propice aux investissements lourds dont la rentabilité ne s'inscrit qu'à moyen et long terme;
- concurrence vive des procédés d'économie d'énergie;
- concurrence tout aussi importante des énergies traditionnelles (charbon, gaz, ou encore électricité) compte tenu des politiques tarifaires et de raccordement pratiquées, voire des sous-évaluations latentes (cf. déficits d'EDF et de GDF).

Dans la conjoncture actuelle, investir des sommes importantes pour utiliser ce type de ressources est-il justifié ?

Comme toute technologie nouvelle, la géothermie a connu une phase expérimentale de lancement, faite non seulement d'explorations infructueuses comme nous l'avons vu précédemment, mais aussi d'inadaptations, de sous-évaluations des investissements de surface, des consommations recensées, ou encore des frais financiers intercalaires. Les évaluations économiques récentes menées par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie montrent que la phase expérimentale de lancement est aujourd'hui dépassée et que les opérations sont réalisées dans des conditions économiques très intéressantes pour la majorité des promoteurs et pour les Pouvoirs Publics. En effet, le taux de rentabilité interne avant subvention est toujours supérieur à 9 % pour une durée de vie des installations de 20 ans. Le calcul du taux de rentabilité prend en compte dans ce contexte la construction de réseaux de chaleur. Si ceux-ci existaient déjà, la compétitivité des MWh géothermiques serait extraordinaire.

Quelle est la constitution de l'investissement en géothermie ? En moyenne 38 % de cet investissement seront consacrés au sous-sol, 54 % à la surface, 8 % à des investissements divers. Sur 18 opérations récemment lancées, le montant total de l'investissement varie entre 37 000 kF HT et 128 000 kF HT suivant l'importance des réseaux et le nombre de doublets, soit une moyenne de l'ordre de 51 300 kF HT par opération, et un montant de 11 600 F HT par TEP substituée. Le taux de rentabilité interne de ces opérations varie de 9 à 14,93 (moyenne 12,14), le temps de retour de 5,2 ans à 8,9 ans (moyenne 7,5 ans). L'économie réalisée la première année d'exploitation varie de 2,1 % à 18,8 % (moyenne 8,57 %).

Les 18 opérations ainsi analysées sont celles de Garges-les-Gonesse, Tremblay-les-Gonesse, Bondy-Nord, Aulnay Gros Saule, Epinay-sous-Sénart, Cachan (1^{er} doublet), Sucy-en-Brie, Maisons-Alfort Sud, Villiers-le-

Bel/Gonesse, Chevilly-Larue/L'Hay-les-Roses (2 doublets), Soisy/Eaubonne, Bagneux, Champigny, Chelles, Thiais, Bonneuil, Orly II, Créteil, correspondant à des opérations dont les débuts de travaux vont du 2^e semestre 1983 au 1^{er} semestre 1985.

L'ensemble de ces 18 opérations représente 83 623 logements, soit une moyenne de 4 400 logements par doublet, et un investissement moyen de 11 650 F HT par logement.

Comment se situe le coût de l'énergie géothermique par rapport aux énergies classiques des réseaux de chaleur ? Une étude récente (septembre 1984), menée par la Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies (FNCCR) et le CNET-HLM à la demande de l'AFME, donne l'ordre suivant :

- la géothermie en-dessous de 200 F HT par MWh,
- le charbon de 140 à 240 F HT par MWh,
- le fuel lourd de 180 à 320 F HT par MWh.

Encore cette étude n'est-elle menée que sur des opérations relativement anciennes. Les opérations précédemment citées devraient aboutir à un coût de l'énergie géothermique encore nettement plus compétitif.

Ce facteur est particulièrement important, d'autant que la géothermie peut être considérée comme une énergie véritablement nationale, une statistique récemment effectuée montrant en effet que la part de fournitures et services étrangers dans une opération de géothermie ne représente que 3,5 % de l'investissement total en moyenne, alors que la part du fuel et des autres énergies payables en devises (charbon, gaz) reste encore très importante dans le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire pour les secteurs résidentiels et tertiaires.

Enfin, il faut noter que si les investissements concernant la surface n'ont pas augmenté, par contre ceux concernant le sous-sol ont connu, entre fin 1980 et fin 1983, une baisse d'environ 13 % de leur valeur en francs constants, avec deux grandes progressions technologiques :

- une diminution très importante des durées de forage (100 à 110 jours fin 1980 à 60 jours fin 1983, par doublet),
- une amélioration des équipements, en particulier concernant les pompes d'exhaure.

Il est encore trop tôt pour réaliser une évaluation précise du coût d'exploitation de ces installations. Seules quelques-unes fonctionnent depuis quelques années :

- Melun d'Almont depuis 1971,
- Villeneuve-la-Garenne depuis 1976,
- Creil depuis 1976,
- Le Mée-sur-Seine depuis 1978,
- Coulommiers depuis 1982.

Toutes les autres opérations ont vu leur mise en service s'étager entre 1982 et 1984. D'ores et déjà, des progrès substantiels ont été faits quant à la fiabilité des installations.

Ceci n'a pu se faire que grâce à la structuration d'un secteur industriel nouveau. Rappelons qu'en 1975, les moyens d'atteindre les objectifs envisagés puis fixés au IX^e plan n'existaient pas. Pour répondre à la demande des Pouvoirs Publics, les industriels français ont embauché et investi.

De 1979 à 1981, le parc de machines de forage consacrées à la recherche géothermique passait de 2 à 6 appareils, représentant un investissement de 140 millions de francs. Plus de 500 personnes étaient embauchées, des sociétés se créaient, particulièrement en matière d'ingénierie de sous-sol et d'ingénierie thermique spécialisées.

Début 1984, le potentiel industriel de la géothermie française est constitué, entre autres, par :

- 6 machines de forage spécialisées et insonorisées afin de pouvoir travailler en zone urbaine à 2 000 mètres de profondeur et plus de 45 ° de déviation,
- 4 sociétés d'ingénierie de sous-sol spécialisées dans la recherche et la mise en production de l'énergie géothermique basse et haute température,
- plus de 10 sociétés d'ingénierie thermique spécialisées dans l'utilisation de la géothermie,
- près de 8 sociétés spécialisées intéressées par la production de tubes pour les forages ou pour les canalisations de surface,
- plus de 20 sociétés qui se sont spécialisées dans la pose des réseaux de chaleur et dans le génie climatique,
- plus de 10 sociétés qui ont investi dans la recherche et l'innovation pour la fabrication d'échangeurs à plaques ou de pompes à chaleur.

L'ensemble de ces moyens représente actuellement près de 3 500 personnes dont l'activité est consacrée à la mise en exploitation et à l'utilisation de cette énergie, représentant un chiffre d'affaires annuel d'environ 1 milliard de Francs.

L'industrie française de la géothermie a actuellement un potentiel qui n'est utilisé qu'à 25 % de sa capacité. En effet, la baisse du nombre d'opérations engagées en 1983 et la confirmation de cette tendance en 1984 n'engage pas à l'optimisme.

**

Quelles sont les perspectives ? Face à une conjoncture énergétique fluctuante et à un cours du dollar non moins hésitant, le développement de l'utilisation de tels types de ressources passe par l'abaissement des investissements initiaux.

Le bon moyen est l'exploitation des ressources à faible et moyenne profondeur.

Le gisement géothermique moyenne profondeur est évalué à 600 000 TEP, à comparer aux 1 586 M TEP du potentiel géothermie profonde. Pour l'Ile-de-France, qui est de loin la première région pour le développement géothermique, le potentiel profond (Paris non compris) Trias + Dogger est de 1 130 kTEP, tandis que le potentiel moyenne profondeur (Lusitanien + Néocomien) est de 490 kTEP, soit 43 % environ du seul potentiel profond, et 30 % du potentiel total. Sur ces 490 kTEP, 247, soit la moitié, viennent de ressources bien connues, ce qui est économiquement favorable. Le créneau des moyennes profondeurs devrait alors s'ouvrir car les coûts moins élevés en investissements sous-sol permettraient le montage d'opérations avec un nombre unitaire de logements plus faible (de 500 à 1 500 selon les cas).

Par ailleurs, concernant les banlieues sud et sud-est, nord et nord-est de Paris, où l'ensemble des projets au Dogger entraîne une saturation à peu près complète de

LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

LA GÉOTHERMIE EN RÉGION PARISIENNE

LEGENDE

■ Forage géothermique au Trias

▲ Forage géothermique au Dogger

● Forage géothermique au Barrémien

l'espace disponible, le recours au Néocomien, voire au Lusitanien, devrait permettre d'augmenter le nombre d'exploitations.

Pour d'autres régions, telles que l'Aquitaine, la Lorraine, l'Alsace, le Dogger du pourtour du Bassin Parisien, le Languedoc-Roussillon ou le Couloir Rhodanien, il n'est pas impossible que le potentiel des ressources à moyenne profondeur soit supérieur à celui des ressources profondes. Cela concerne alors un ensemble de régions beaucoup plus vaste que précédemment et un nombre accru d'utilisateurs potentiels.

L'utilisation énergétique des ressources à faible profondeur et très basse température constitue également une possibilité non négligeable, car les coûts d'investissement sont encore plus faibles.

Une approche effectuée avec le concours d'EDF montre que, dans le secteur de l'habitat collectif, 12 à 15 000 équivalents-logements sont déjà équipés en France avec ce type d'énergie, essentiellement sur nappes peu profondes. L'industrie, l'agriculture (serres) et le tertiaire représenteraient au total 5 000 équivalents-logements sur le même type de ressources. A terme, les objectifs du programme PERCHE sont d'équiper 50 % du tertiaire d'hébergement, toutes techniques confondues.

En supposant que les opérations par pompes à chaleur sur aquifères ne représentent que 20 % de ces objectifs, le potentiel réalisable se situera entre 8 et 10 000 équivalents-logements par an, soit une substitution de l'ordre de 10 000 TEP par an, soit le tiers des résultats attendus des opérations engagées en géothermie profonde en 1984.

Rappelons que les ressources hydrogéologiques françaises dont les nappes ont une température comprise entre 10 et 20 °C couvrent 30 % de la surface du territoire. L'alimentation et le taux de renouvellement de ces aquifères permettent souvent leur exploitation en puits unique en zone de faible urbanisation, ou selon d'autres dispositifs en zone plus urbanisée.

Peut-on craindre une surexploitation éventuelle ou des conflits d'usage avec les utilisateurs habituels de ces nappes ? Les études économiques menées dans le cadre des inventaires départementaux ont montré que, sauf cas exceptionnels, l'exploitation des nappes par pompes à chaleur ne commençait à trouver sa rentabilité que pour des collectifs d'au moins 50 à 100 équivalents-logements. Par ailleurs, les mesures nouvellement adoptées dans le cadre de la procédure AQUAPAC devraient permettre d'assurer une certaine gestion en matière d'exploitation de l'énergie thermique des nappes superficielles.

Enfin, il faut mentionner les actions de recherche menées actuellement en géothermie par plusieurs laboratoires (IMRG, Ecole Nationale Supérieure des Mines/ARMINES, CNRS/PIRSEM, CEA, IFP), actions auxquelles participent également des sociétés d'ingénierie ou de recherche pétrolière dans le cadre des opérations en cours de réalisation (GEOTHERMA, BURGEAP, ELF-ERAP/DIENIC).

Les objectifs prioritaires de la recherche sont étroitement liés à l'application : utilisation des nappes phréatiques par pompes à chaleur ainsi que pour le stockage de calories, exploration d'objectifs nouveaux (Lusitanien), exploitation des réservoirs basse température classiques, notamment eaux du Dogger et du Trias, prospection et exploration des gisements à haute température.

Des objectifs à plus long terme portent sur la production d'électricité à partir de fluides à moyenne température (100 — 150 °C) au moyen de centrales à fluide binaire. Enfin, dans le cadre d'un programme géothermie profonde généralisée (GPG), l'exploration des roches chaudes sèches en zone de gradient normal est envisagée avec analyse économique préalable de l'utilisation de cette ressource.

En quelques années, la France s'est hissée au premier rang mondial en matière de géothermie basse température. Ce type d'énergie suscite actuellement un grand intérêt

dans le monde. Cette activité peut être exportée (ingénierie, entreprise, équipements).

Le marché de la géothermie basse température est de plus l'élément porteur indispensable à la conquête des marchés de la géothermie haute température qui sont demandeurs d'équipements lourds (turbines, alternateurs, etc.). A ce titre, les travaux en cours dans les départements et territoires d'outre-mer (Guadeloupe, Réunion, Martinique, etc.) constitueront une « vitrine » qui devrait permettre à nos équipes d'émerger sur le marché mondial de la haute température.

CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPALES OPÉRATIONS RÉALISÉES (avril 1983)

OPÉRATIONS	MAÎTRE D'OUVRAGE	MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ	Conseiller ou Assistant du Maître d'Ouvrage	MAÎTRES D'OEUVRES		Année de Réalisation des forages	CARACTÉRISTIQUES DE L'AQUIFÈRE CARTE			Nombre de TEP annuels mis en place	Nombre d'équipements Logements raccordés	OBSERVATIONS
				SOUS SOL	SURFACE		Réservoir	T °C (1)	Débit (2) M ³ /h			
MELUN L'ALVONTOIS (77)	STANL		CGC			1971	Daguer	72	100	1500	2500	Concession
LE MEE SEINE (77)	CCGU		GEOHERMA			1978	Daguer	72	200	4500	3000	Concession
VILLENEUVE LA GARENNE (92)			GEOCONFORT (filiale de la CFI)			1976	Daguer	57	50	1400	1700	Concession
CREIL (60)	OPILM Creil		BRGM	TETA/PANICA		1976	Daguer	58	150	3800	4200	
BLAGNAC (33)	UTEC		ELF CGC			1978	Eocene	59	50	1500	Zac de Blagnac	Concession
MONT DE MARSAN (40)	COGETEC		ELF CGC			1977	Santonien	61	300	2000	Basse aérienne + logements + Ets publics	Concession
DAX (40)	Ville		CGC	BRGM		1979	Cenomanien	56	150	800	ZAC 11000 m ² (sans logist)	Concession
MAISON DE LA RADIO (75)	ORTF					1980	Albien	28	50			
JONZAC (17)	Ville		BRGM	TREPAUD		1980	Trias	62	40	450		
CERDQ PONTISE (95)	EPA CERDQ		BRGM	BETURE		1980	Daguer	57	200	2400	3000	dont 2000 logements neufs en cours de construction
MELLERAY (45)	GIE GEOVAL		BRGM	DET		1980	Trias	74	120	2500	Chauffage de serres	Difficulté à la réinjection
COULONNIERS (77)	Syndicat Mixte		Géochaleur	BRGM	SECOTER	1980	Daguer	85	250	3000	2200	
MONTGERON (91)	S.A. S.H.M. La Sennonne		Géochaleur	GEOHERMA	AUXITEC	1980	Daguer	72	220	2900	2100	900 logements supplémentaires seront raccordés en Octobre 1982
LA COURNEUVE SUR LA VILLE DE PARIS (93)	OPILM de la Ville de Paris		Géochaleur	BRGM	BETURE	1980	Daguer	58	180	2000	3000	Opération avec PAC
BORDEAUX MERIAUX (33)	Regie Municipale du gaz de Bordeaux	SBRU	Géochaleur	BRGM	TETA	1980	Cenomanien	53	150	1600	1200	
AULNAY BOIS (93)	S.A. S.H.M. 100 logements français		Géochaleur	BRGM	ETE	1981	Daguer	71	220	3500	3100	1700 logements supplémentaires dont les raccordements sont à l'étude
BEAUVAIS (60)	OPAC de l'OM		Géochaleur	BRGM	TETA	1981	Daguer	47	180	1400	1300	Opération avec PAC
CLICHY BOIS (93)	Ville	Société 83	Géochaleur	BRGM	BERIM	1981	Daguer	71	220	2700	3300	
ORLY (94)	OPAC du Val de Marne		Géochaleur	GEOHERMA	SEFS	1981	Daguer	76	240	2900	3100	
REIMS MURIGNY (51)	Ville	SEDMA	Géochaleur	BRGM	TETA	1981	Lustanien	47	40	1050	1300	Récupération de chaleur sur chaufferie Gaz
LAMAZERE (32)	Association des propriétaires de Lamazere	C.A.C.G.		ELF		1981	Eocene	56	150	1500	1800	
EVRY (91)	SEARE	EPEVRY	Géochaleur	BRGM	TETA	1981	Daguer	71	200	3800	3500	Au stade final (raccordements schéma 121 et 122)
FONTAINEBLEAU (77)	Syndicat Mixte	GEOCHALEUR		BRGM	DET	1982	Daguer	74	130	1900	1800	Reseau de chaleur urbain
MISORANGIS (91)	S.A. S.H.M. de l'Essonne		Géochaleur	GEOHERMA	DET	1982	Daguer	72	220	3100	2500	
BRUYERES LE CHATEL (91)	CEA			BRGM	SAILLY	1981	Neocomien	34	150	1200	1000	Opération avec PAC
RESSAC (32)	S.A. S.H.M. La Gironde		Géochaleur	BRGM	TETA	1982	Cenomanien	48	200	1450	1600	Opération avec PAC
MEAUX P. COCHET (77)	Syndicat Mixte	GEOCHALEUR		BRGM	SECOTER	1981	Daguer	79	250	3800	3200	
MEAUX D. J. N. V. (77)	Syndicat Mixte	GEOCHALEUR		BRGM	TETA	1982	Daguer	78	250	3500	3800	Reseau de chaleur urbain
ACHERES (78)	S.A. S.H.M. La Tour de la Tour		Géochaleur	GEOHERMA	DET	1982	Daguer	57	200	2500	2700	Trias éocène Opération avec PAC
LA COURNEUVE NOIR (93)	Syndicat Mixte		Géochaleur	BRGM	ETE	1982	Daguer	58	200	3000	3000	1000 logements neufs sont amenés à l'écouler
SEVRAN (93)	SEAPRA	SAES	Géochaleur	BRGM	BETURE	1982	Daguer	69	250	2800	2600	Le raccordement des 1200 logements est prévu
EPERNAY (51)	Ville	SEDMA	Géochaleur	BRGM	TETA	1982	Daguer	80	110	2900	3000	
CREIL II (60)	OPILM de CREIL		Géochaleur	BRGM	TETA	1982	Daguer	59	200	3000	3200	Opération avec PAC
PORTE DE ST CLOUD (75)	Ville de Paris		Géochaleur	GEOHERMA	TETA	1982	Daguer	62	220	5700	5800	Dont 5000 m ² raccordés au réseau CCGU
BLANC MESNIL NOIR (93)	SEAPRA	JODEGAT 93	Géochaleur	BRGM	BERIM	1982	Daguer	68	220	2400	3200	
LA CELLE ST CLOUD (78)	SEMP			ELF CGC		1982	Daguer	62	170	1500	2250	Concession (COGETEC)
MEAUX BRUYERES II (77)	Syndicat Mixte	GEOCHALEUR		BRGM	TETA	1982	Daguer	78	380	12 500	8 500	ZUP de Bréval (2.500 m ²)
BORDEAUX MERIAUX (33)	Regie Municipale du gaz de Bordeaux	SBRU		BRGM	MONTENAY	1981	Cenomanien	45	150	1 500	1 400	
CHATELAIN MALBRY (92)	Syndicat Mixte	GEOCHALEUR		GEOHERMA	SEHMET	1982	Daguer	67	220	2600	3700	dont 2700 logements déjà par l'OPILM des M. de la Seine
CHATEAUBOUX (26)	S.A. S.H.M. de l'Indre		Géochaleur	GEOHERMA		1982	Trias	34	120	1100	1500	Opération avec PAC
VAUX-LE-PENIL (77)	Ville de SEM	CGC	Géochaleur	GEOHERMA		1982	Daguer	72	200	2750	2900	Concession
CHAMGUILLES CONNESSES (95)	Ville	SAEPF	Géochaleur	BRGM	BERIM	1982	Daguer	67	230	2800	2500	Etude d'extension en cours portant sur 2 opérations parallèles

(1) Température au fond du réservoir

(2) Débit moyen avec pompes immergées

Discussion

Président : M. J. VARET

M. GUEDE. — L'objectif fixé en 1977, à savoir 1 million de TEP géothermiques, émanait-il d'un optimisme scientifique et politique ? Existe-t-il actuellement des subventions pour la géothermie ?

M. VATHAIRE répond que l'objectif gouvernemental de 1977 était en effet de 1 million de TEP géothermique à constituer en 1990. Aujourd'hui nous en sommes à 180 000 TEP. Deux aspects sont à considérer :

1) on estime à l'heure actuelle le gisement français à 600 000 TEP;

2) les collectivités locales font appel aux Pouvoirs Publics qui prennent en charge le risque minier par le biais de subventions. Depuis 1982 les financements étaient pris en charge par la deuxième tranche du fonds spécial « grands travaux ». Ils sont devenus inexistantes à partir de la troisième tranche : on a considéré que l'énergie n'était plus un secteur prioritaire.

Les industries géothermiques françaises représentent à l'heure actuelle 3 500 personnes et plus de 45 sociétés, ainsi qu'un savoir-faire qui va disparaître. C'est d'autant plus navrant que nous avons quasiment acquis un leader ship sur le plan mondial en matière de développement de ce type d'énergie et que nous commençons déjà à l'exporter. Demain, nous allons probablement perdre tous ces acquis.

M. CLÉMENT demande si des études de marché relatives à la géothermie de très faible profondeur (500 m) ont été menées.

LE PRÉSIDENT répond que des inventaires départementaux et des études de pré-faisabilité ont été faits. Il a été montré, par exemple, que l'utilisation d'une nappe phréatique située à 30 m de profondeur devient économiquement très intéressante à partir d'un ensemble collectif de l'ordre de 50 logements. D'autre part, concernant les émetteurs à basse température, une opération pilote a été conduite en région Centre. Il s'agit d'un ensemble H.L.M. de 100 logements où, en trois ans, les dépenses de chauffage, investissements compris, ont été divisées par trois.

M. GRJEBINE pose le problème de la rentabilité des opérations de géothermie et remarque que ces dernières font l'objet de calculs d'amortissement linéaire sur 7 ans et demi alors que les opérations utilisant d'autres sources d'énergie sont indexées sur l'inflation. Il conclut que la géothermie, si une publicité plus importante lui était faite pourrait se développer beaucoup plus.

M. VATHAIRE rappelle que la géothermie n'a pas la puissance politique des autres secteurs de production même si elle concerne en France 45 Sociétés, 3 500 personnes et représente un chiffre d'affaires de l'ordre de 1 milliard de francs par an. De ce fait, l'impact commercial de la géothermie est tout à fait relatif et la position de Gaz de France, par exemple, ne facilite pas son expansion. Il regrette enfin l'absence de plans énergétiques régionaux.