

EXPLOITATION ET DEVELOPPEMENT DE RESERVOIRS GEOtherMIQUES BASSE ENTHALPIE: LE DOGGER OU BASSIN PARISIEN

JUAN ROJAS

*Institut Mixte de Recherches géothermiques
BRGM-IMRG - BP 6009, 45060 ORLEANS CEDEX 2, FRANCE*

A feature of French geothermal engineering is the development of industrial projects in normal gradient, non-convective areas. The Economic feasibility of exploiting highly productive wells (between 150 and 350 m³/h at temperatures from 55° to 85°C and depths of 1,500 to 2,000 m) for direct heat production in sedimentary basins with normal gradient, has been proved by the 50 plants mounted during the last few years which provide heat for over 500,000 people. This opens new possibilities for geothermal energy development over the world, in particular for areas where heat consumption is higher than 2,500 Toe/year in a few km². The recent and rapid development of geothermal projects in France, in particular in the Paris Basin has provided much more information on the characteristics of the Jurassic "Dogger", which is the unit tapped by most geothermal doublets (one production and one injection wells). Detailed study of the Dogger reservoir in the Paris Basin is one of the main objectives of the IMRG research and development program drawn up in 1983. The preliminary results presented here are oriented towards, (i) improved knowledge of the potential geothermal resources, and (ii) analysis of optimum exploitation conditions.

Uma característica da engenharia geotérmica francesa é o desenvolvimento de projetos industriais em áreas não-convectivas de gradiente normal. Foi comprovada a factibilidade econômica de exploração de poços altamente produtivos (entre 150 e 350 m³/h, temperaturas entre 55° e 85°C e profundidades de 1500 a 2000 m) para a produção direta de calor, em bacias sedimentares com gradiente normal, através de 50 plantas instaladas durante os últimos anos, as quais proporcionam calor para mais de 500.000 pessoas. Isto abre novas possibilidades para o desenvolvimento de energia geotermal a nível mundial, em particular, nas áreas onde o consumo de calor é maior que 2.500 Toe/ano em poucos km². O desenvolvimento rápido e recente de projetos geotermiais na França, particularmente na Bacia de Paris, proporcionou muita informação sobre as características do "Dogger" jurássico, que é a unidade perfurada pela maioria dos poços geotermiais (um de produção e o outro de injeção). Estudo detalhado do reservatório "Dogger" na Bacia de Paris, é um dos principais objetivos do programa de desenvolvimento e pesquisa do IMRG, preparado em 1983. Os resultados preliminares apresentados neste trabalho têm as seguintes finalidades: i) melhorar o conhecimento das fontes potenciais de calor e ii) analisar as condições ótimas de exploração.

(Traduzido pela Revista)

INTRODUCTION

Le développement de la géothermie basse enthalpie en France est dû, d'une part, à un contexte favorable né de la crise de l'énergie et d'autre part, à une volonté des pouvoirs publics pour développer des "énergies nouvelles".

C'est dans ce but que dès 1975, le Ministère de l'Industrie et de la Recherche fait procéder, par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) à une évaluation du potentiel géothermique français et à des études générales sur les conditions de son utilisation.

Parallèlement des procédures d'incitation ont été

mises en place: prêts, subventions, garanties de la ressource, etc.

L'ensemble de ces mesures, mais aussi la conjonction favorable, en particulier en région parisienne, de l'existence d'un réservoir géothermique de bonne qualité: le Dogger, situé sous des zones fortement peuplées dont les besoins en chaleur sont importants, ont permis le développement de la géothermie en France, de manière importante à partir des années 1980.

Les opérations de géothermie actuellement en fonctionnement ou en cours d'achèvement, permettront aux conditions nominales de fonctionnement, de substituer 200.000 tonnes équivalent pétrole (Tep) par an fin 1986.

LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE BASSE ENTHALPIE EN FRANCE

La France est relativement bien pourvue en nappes profondes d'eau chaude à plus de 50°C (Fig. 1). Les deux pôles principaux de développement de la géothermie sont les deux grands bassins sédimentaires français: le Bassin parisien (1) et le Bassin aquitain (2). Il existe également des potentialités en Alsace (3), en Limagne (4), dans le Languedoc (5) et probablement en Bresse et dans le couloirs Rhodanien (6). Mais jusqu'à présent, la plupart des forages dans ces régions se sont soldés par des échecs.

Sur les 64 opérations en fonctionnement ou en cours de raccordement, 52 sont situées dans le Bassin parisien, soit 81% des opérations. Sur ces 52 opérations, 49 captent le Dogger; 2 le Trias (Melleray, Châteauroux) et 1 le Néocomien (Broyères-le-Chatel) (Fig. 2).

Le Bassin parisien

Le Bassin parisien est constitué par des couches sédimentaires reposant sur un socle anté-permien et limité par les massifs hercyniens affleurants. Parmi ces couches sédimentaires, de nombreuses formations sont

aquifères: les principales sont reportées sur la coupe de la Fig. 3. Cependant on peut dire que le Dogger constitue actuellement l'objectif n° 1 de la géothermie en France, à lui seul il fournit 90% de la géothermie française. Les réserves en place sont évaluées à 6×10^{18} calories, soit l'équivalent de 600 millions de Tep.

CARACTÉRISTIQUES DU DOGGER DU BASSIN PARISIEN

— Lithostratigraphie

Le Dogger du Bassin parisien correspond à l'ensemble lithostratigraphique à dominante calcaire compris entre les marnes du sommet du Lias et les marnes du Callovien inférieur.

La Fig. 4, donne à titre d'exemple, la série type traversée par un des forages géothermiques.

Elle est représentée par une succession de faciès carbonatés s'intégrant dans une mégaséquence sédimentaire de type régressif allant de sédiments relativement profonds à la base vers des faciès subexondés au sommet (plate-forme externe - barrière - plate-forme interne).

— Niveaux productifs

Les niveaux productifs, comme le montre la Fig. 4,

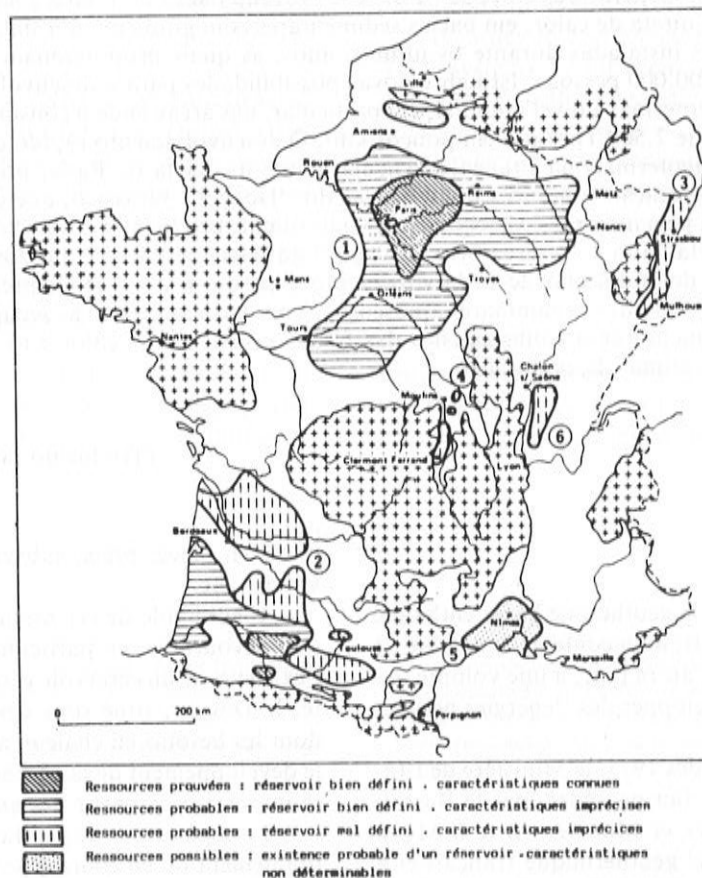


Figure 1 — Ressources Géothermiques zones où l'eau est à plus de 50°

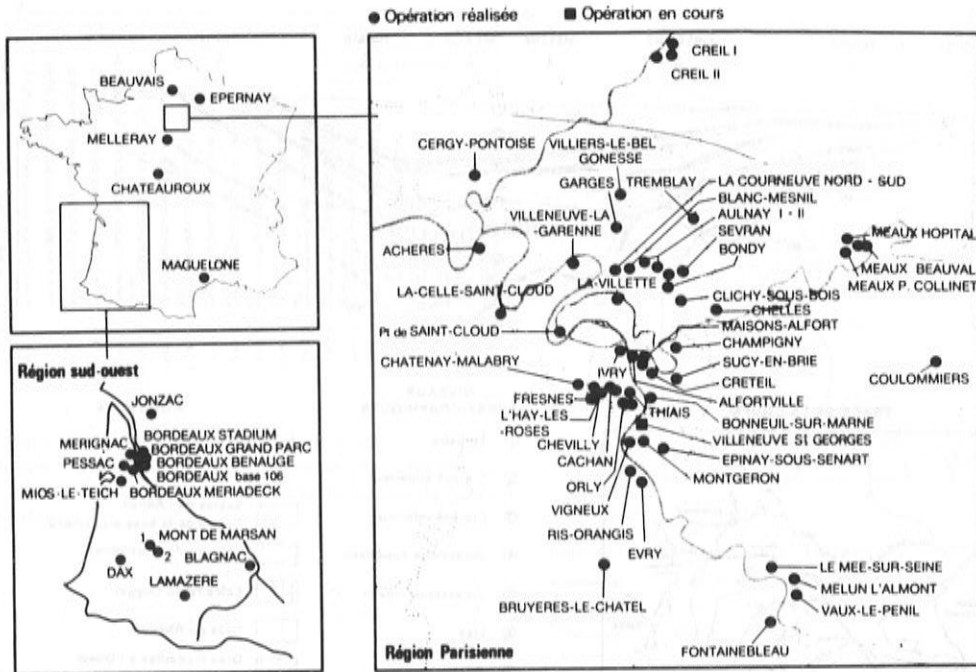


Figure 2 — La géothermie en France, localisation des opérations.

se situent principalement dans le calcaires oolithiques de faciès barrière qui à eux seuls, fournissent entre 30 et 100% du débit dans les puits géothermiques de la région (Fig. 5).

Les valeurs obtenues sont déduites des interprétations de profils de productivité (Fig. 6). On a constaté que la majeure partie du débit dans ces forages provient de zones de faible épaisseur, et que seulement une partie de zones poreuses détectées par diagraphies (voir Fig. 4) produisent réellement.

— *Profondeur*

La carte de la fig. 7 donne la profondeur du toit du réservoir, par rapport au niveau de la mer.

On constate (Fig. 7A) que, la profondeur des forages captant le Dogger, varie de 1200 à 1900 m avec une répartition gaussienne régulière, avec un maximum entre 1400 et 1800 m de profondeur.

— *Température*

La carte de la Fig. 8 donne la température moyenne de l'aquifère, mesurée en débit au toit du réservoir. L'estimation régionale du gradient géothermique donne des valeurs comprises entre 2,7 et 4,1°C/100 m. Le graphique 8A donne la température mesurée en tête de puits. Celle-ci est inférieure de 1 à 2°C à celle de la nappe.

— *Salinité*

La carte de la Fig. 9, donne des courbes d'égale salinité (équivalent NaCl) au toit de l'aquifère en g/l.

Les salinités les plus fortes se rencontrent au centre du bassin (Coulommiers, Meaux), où les profondeurs

sont les plus grandes. La répartition de salinités présentée dans la Fig. 9 met en évidence une zone à salinité plus faible orientée NW-SE. Cette zone correspondrait à une circulation préférentielle des eaux météoriques, au moment de la mise en charge de l'aquifère.

Si les eaux du Dogger sont essentiellement chlorurées-sodiques, elles contiennent aussi des gaz dissous, tels que: H₂S, CO₂, et CH₄.

— *Transmissivité* (Fig. 10)

Ce paramètre fondamental pour déterminer la productivité de l'aquifère est calculé à partir d'un test de production à débit constant, suivi d'une remontée de pression. L'enregistrement utilisé pour l'interprétation concerne cette dernière période; il est obtenu à l'aide d'une sonde de haute précision positionnée au toit du réservoir.

MISE EN OEUVRE DE LA RESSOURCE

Le doublet

L'exploitation du Dogger s'effectue selon la technique du doublet (Fig. 11). Le fluide géothermique est extrait par un puits de production, il cède ensuite sa chaleur au réseau de distribution à l'aide d'un échangeur, il est réinjecté dans l'aquifère par un puits d'injection.

La réinjection a l'avantage de maintenir constant le potentiel de production de la nappe. En effet, l'intérêt géothermique de ces nappes d'eau chaude, est de fournir une puissance calorifique importante, grâce à un débit élevé à température constante.

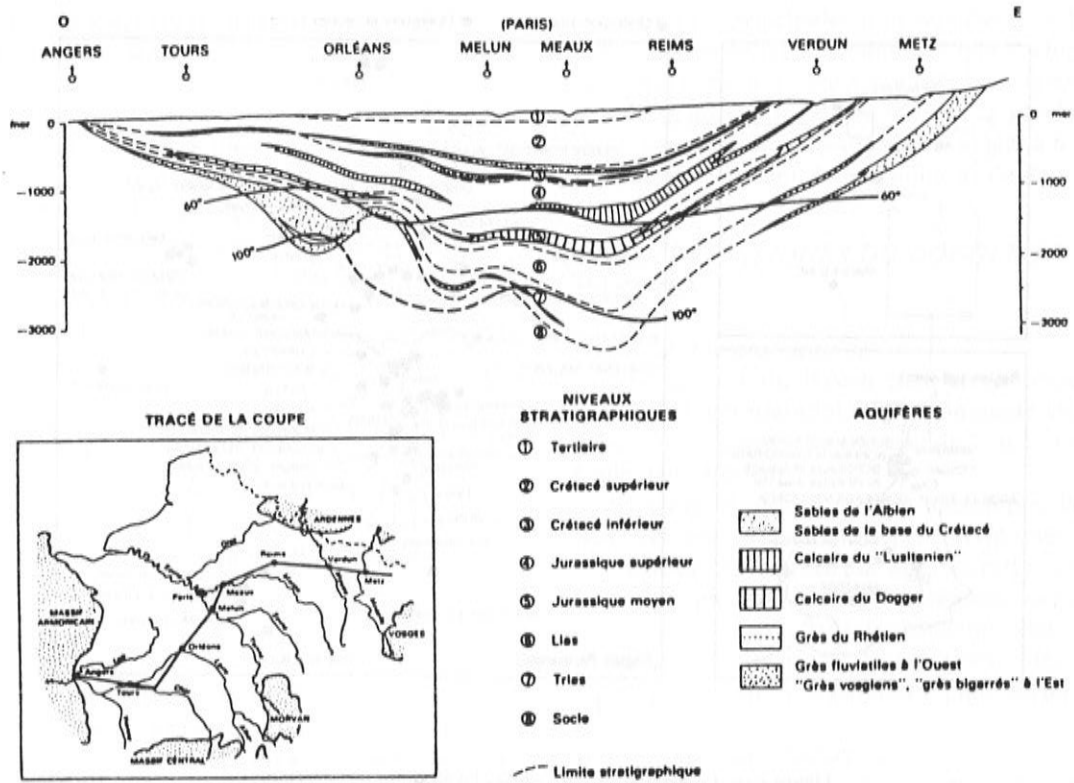


Figure 3 — Coupe schématique des aquifères profonds du bassin parisien

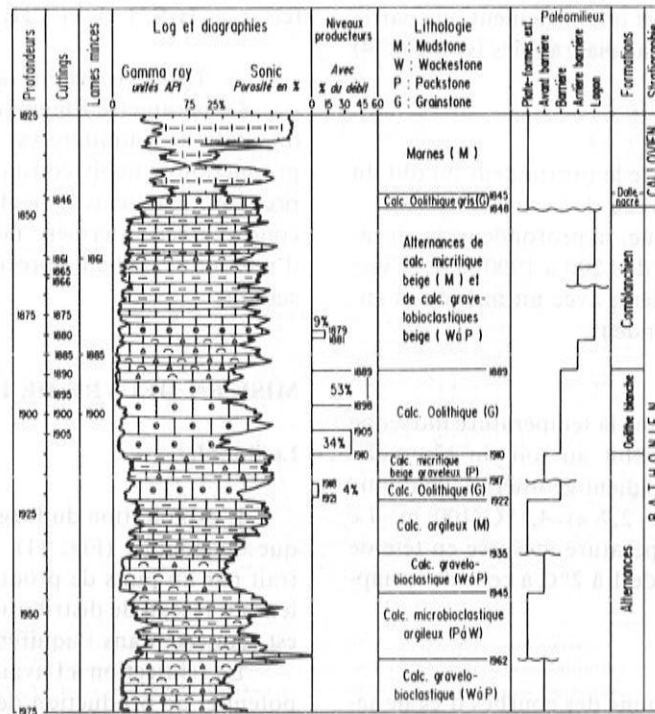


Figure 4 — Log sédimentologique type du Dogger

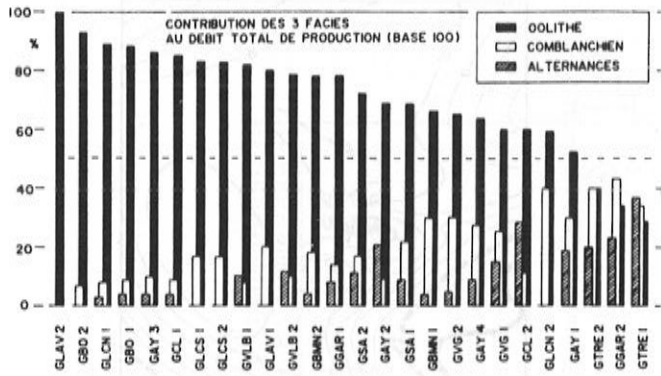


Figure 5 — Comparaison des productions relatives des 3 faciès du Dogger d'après les 26 forages géothermique implantés en Seine St Denis. Classement selon la contribution du faciès oolithique.

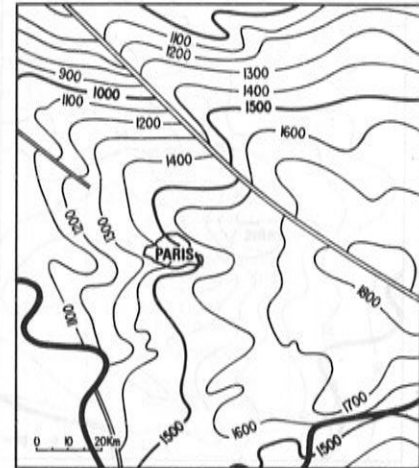
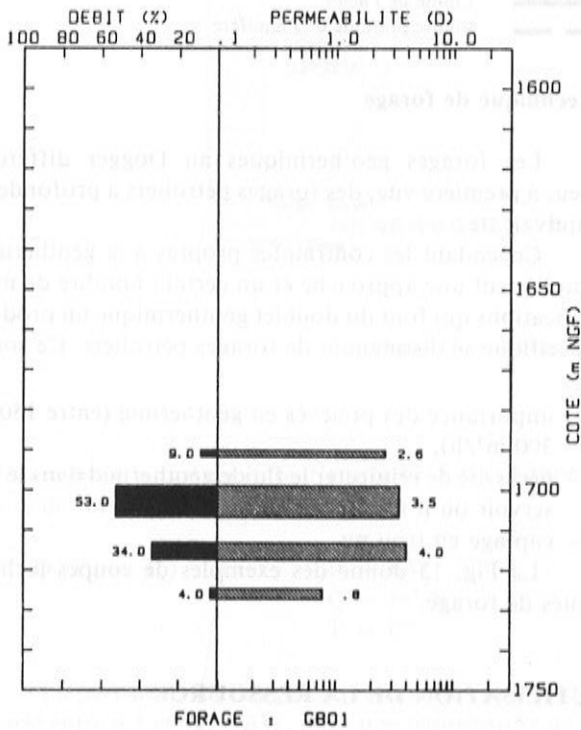


Figure 7 — Profondeur du Dogger.
 Courbe d'égale profondeur au toit du Dogger calcaire (en mètre, cote NGF)
 Faille



PARAM. MOYENS	SERIE COMBL.	SERIE OOLIT.	SERIE ALTER.	SERIE TOTALE
H m	1.8	12.4	2.7	16.9
KH Dm	4.8	45.1	2.1	52.0
K D	2.6	3.6	.8	3.1
Q %	9.0	87.0	4.0	100.0
ZB NGF	1690.9	1707.7	1726.0	1706.9

Figure 6 — Exemple de traitement de profil-flowmeter

Or le débit ne peut être maintenu à des niveaux élevés pendant plusieurs années qu'à la condition de réinjecter dans le réservoir l'eau refroidie après utilisation de ses calories.

La réinjection est de toute façon imposée par la législation française, dans le cas où l'eau est salée, et son rejet en surface peut provoquer des pollutions.

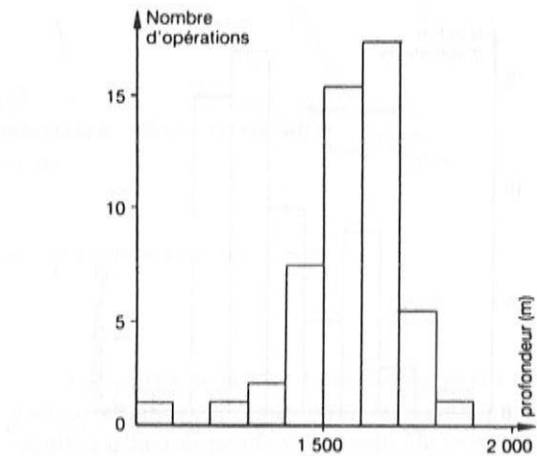


Figure 7a — Profondeur des forages des opérations au Dogger.

Ecartement du doublet

Pendant l'exploitation d'une nappe par doublet, se crée autour du puits de réinjection une zone à température égale à celle de l'eau réinjectée. Ce front froid qui s'étend dans le temps de façon plus ou moins rapide, finit par atteindre au bout de plusieurs années le puits de production, dont la température commence à chuter très lentement (de 1 à 4°C tous les 10 ans suivant le cas).

On doit donc calculer au préalable la distance ou l'écartement entre les deux puits du doublet, au niveau de l'aquifère, de telle sorte que l'abaissement de température ne se fasse pas sentir au puits de production, pendant une durée au moins égale à la durée de vie de l'installation (habituellement fixée à 30 ans).

Le calcul de l'écartement entre le puits de production et de réinjection d'un doublet et le temps de propagation du front thermique se fait par modélisation mathématique des écoulements et des transferts thermiques (Fig. 12).

Figure 8 — Température au toit du réservoir du Dogger.
 Courbe d'égale température au toit de l'aquifère principal (pal (°C))
 Limite d'extension de l'aquifère principal du Dogger

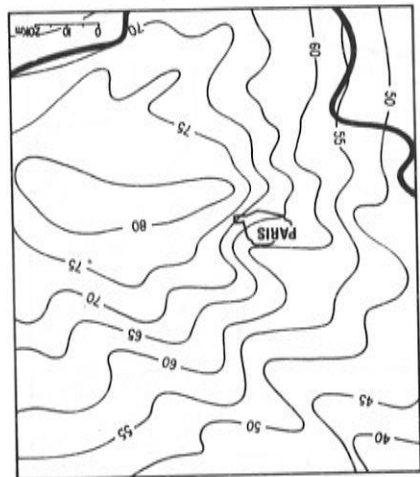


Figure 8a — Température en tête de puits de production dans les opérations géothermiques au Dogger.

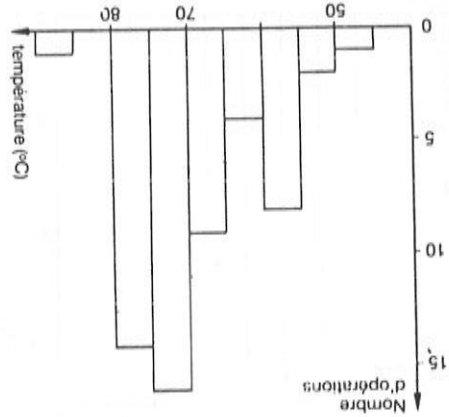
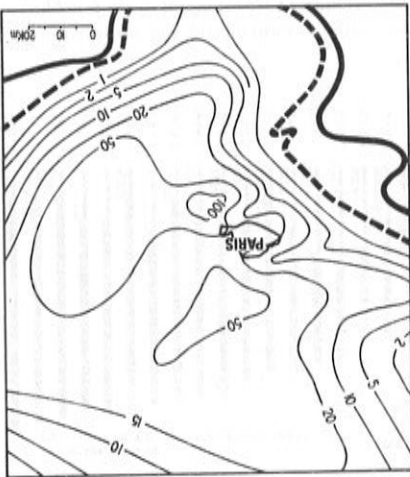


Figure 10 — Transmissivité du Dogger.
 Courbe d'égale transmissivité (en darcy-mètre)
 Limite de Facès
 Limite pratique de l'aquifère



Les forages géothermiques au Dogger diffèrent peu, à première vue, des forages pétroliers à profondur équivalente.

Cependant les contraintes propres à la géothermie impliquent une approche et un certain nombre de modifications qui font du doublet géothermique un produit spécifique se distinguant de forages pétroliers. Ce sont :

- importance des prélèvements en géothermie (entre 150 et 300 m³/h),
 - nécessité de réinjecter le fluide géothermal dans le réservoir où il a été prélevé.
- La Fig. 13 donne des exemples de coupes techniques de forage.

UTILISATION DE LA RESSOURCE

Le ressource géothermique basse enthalpie en France, est essentiellement utilisée pour le chauffage des habitations et de l'eau chaude sanitaire.

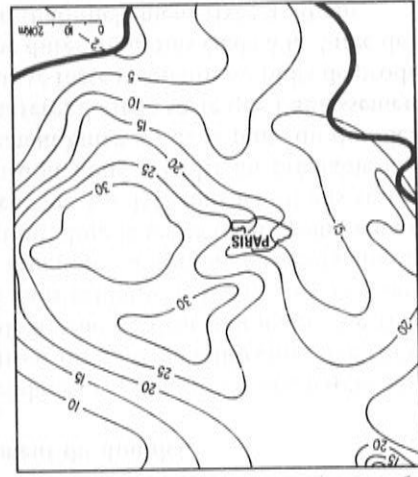
Pour qu'une opération géothermique soit économiquement rentable, il est nécessaire qu'elle desserve un nombre suffisant de logements. Il est de l'ordre de 2000 équivalents logements (d'une surface moyenne de 70 m²) pour une opération au Dogger.

Pour déterminer les avantages et les limites de l'utilisation de la chaleur géothermique sur un site donné, il est nécessaire de disposer d'une estimation aussi précise que possible des caractéristiques de la puissance géothermique disponible et de la puissance demandée.

Puissance géothermique

La puissance (P) fournie pour une installation géothermique est une fonction croissante du débit (Q) et de

Figure 9 — Salinité des eaux du Dogger.
 Courbe d'égale salinité (équivalent NaCl) au toit de l'aquifère (en g/l)
 Limite d'extension de l'aquifère principal du Dogger



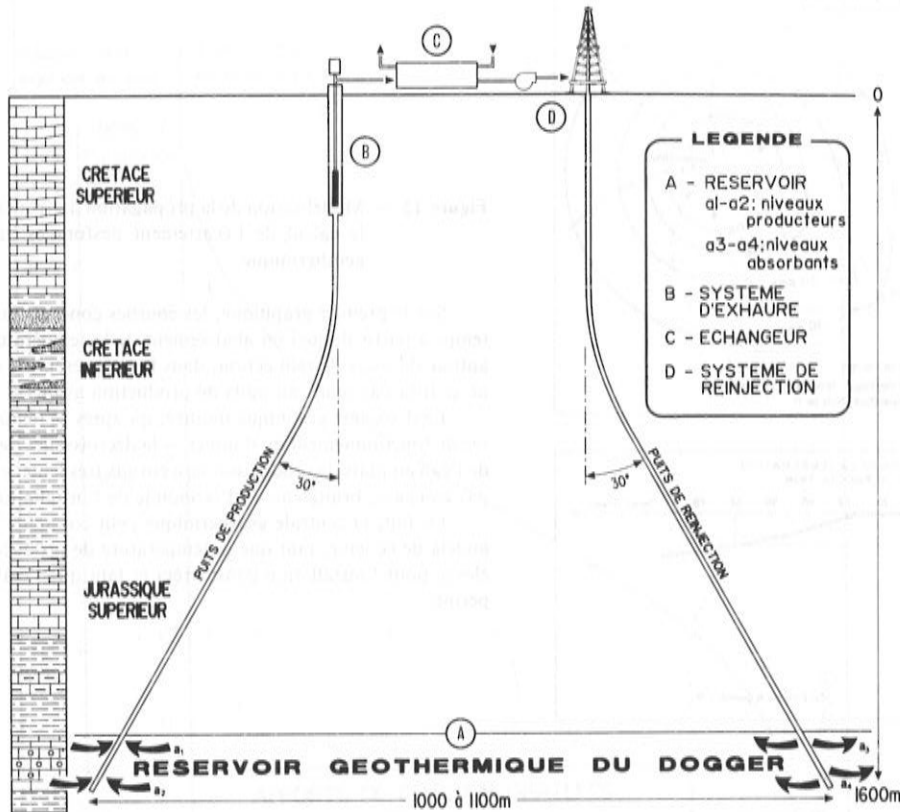


Figure 11 — Schema d'une boucle géothermale au dogger

l'écart entre la température d'entrée (T_e) et la température de sortie (T_s) de l'échangeur:

$$P : Q (T_e - T_s) \quad \text{où} \quad \begin{aligned} P &= \text{KW} \\ Q &= \text{m}^3/\text{h} \\ T &= \text{C}^\circ \end{aligned}$$

La puissance fournie par les installations au Dogger varie entre 6,5 et 14,5 MW, pour une température de retour de 35°C.

Puissance demandée

La puissance demandée, c'est-à-dire la quantité de chaleur à fournir par unité de temps s'exprime par:

$$P = [GV (T_i - \Delta t_g) - T_e]$$

où: G est le coefficient de déperdition volumique ($\text{W}/\text{m}^3\text{C}^\circ$); V est le volume de chauffe (m^3); T_i est la température intérieure que le chauffage doit assurer. En France elle est égale à 19°C; Δt_g est le gain de température dû aux apports gratuits (apports solaires, cuisine, occupation, etc.); T_e est la température extérieure (°C).

La puissance demandée pour un volume donné, est d'autant plus importante que l'écart entre les températures intérieure et extérieure est élevé.

La courbe de la Fig. 14 réalisée à partir de données météorologiques indique pour la région parisienne, le nombre d'heures pendant lesquelles la température extérieure est inférieure à une certaine valeur. Par exemple le point P signifie que la température extérieure t_e a été inférieure à 12°C pendant 4700 h sur les 5800 h que dure en moyenne une saison de chauffage.

Seule la fourchette de températures situées entre -7°C et +17°C est prise en considération. Au-dessus de +17°C, les apports de chaleur gratuits sont effets suffisants pour assurer un chauffage à 19°C. Par ailleurs, la température de -7°C est une valeur rarement dépassée dans la région parisienne.

Si on porte en ordonnée non plus la température extérieure, mais la puissance de chauffage à mettre en oeuvre dans un logement, la même courbe exprime le nombre de jours pendant lesquels la puissance appelée est supérieure à un puissance donnée.

L'utilisation de la géothermie pour le chauffage urbain dépend aussi du système d'émission de chaleur dans les logements. Comme le montre la Fig. 15, une ressource géothermique à 65°C peut assurer la totalité du chauffage de logements équipés de planchers chauffants même par -7°C. Par contre, elle ne peut subvenir aux besoins des logements équipés de radiateurs si la température extérieure descend en dessous de -3°C.

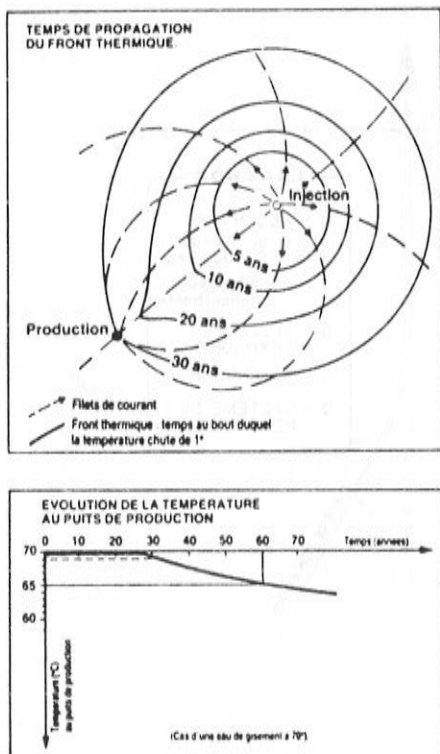


Figure 12 — Modélisation de la propagation du front thermique pour le calcul de l'écartement des forages dans un doublet géothermique

Sur le premier graphique, les courbes concentriques indiquent le temps à partir duquel un abaissement de la température de 1° a lieu autour du puits de réinjection, dans le cas présent, le retroidissement ne se fera pas sentir au puits de production avant 30 ans.

Le deuxième graphique montre, qu'après ce temps — appelé durée de fonctionnement du doublet — la décroissance de la température de l'eau au puits de production sera ensuite très lente: elle ne mot donc pas en cause, brutalement, l'économie de l'installation.

En fait, la centrale géothermique peut continuer à fonctionner au-delà de ce terme, tant que la température de production reste assez élevée pour l'installation considérées et tant que l'étal des forages le permet.

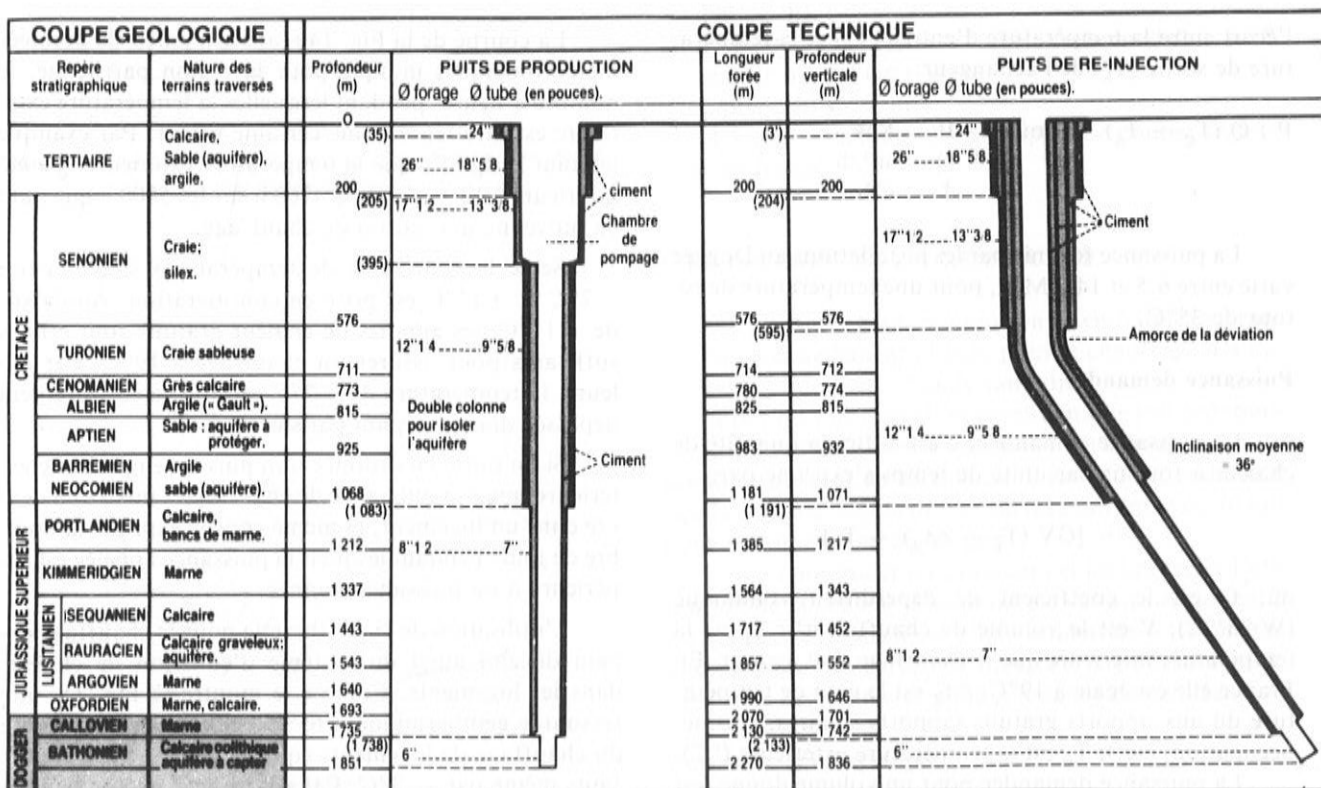


Figure 13 — Coupes techniques des forages d'un doublet géothermique. Exemple

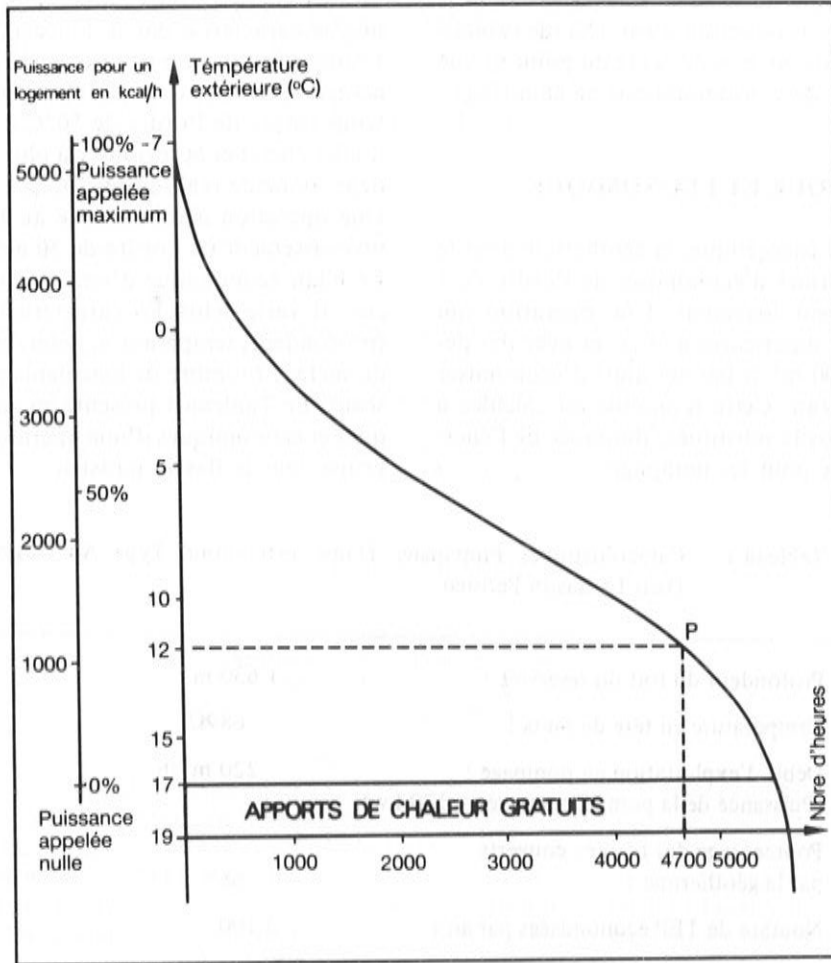


Figure 14 — Courbe de fréquences cumulées des températures moyennes journalières.

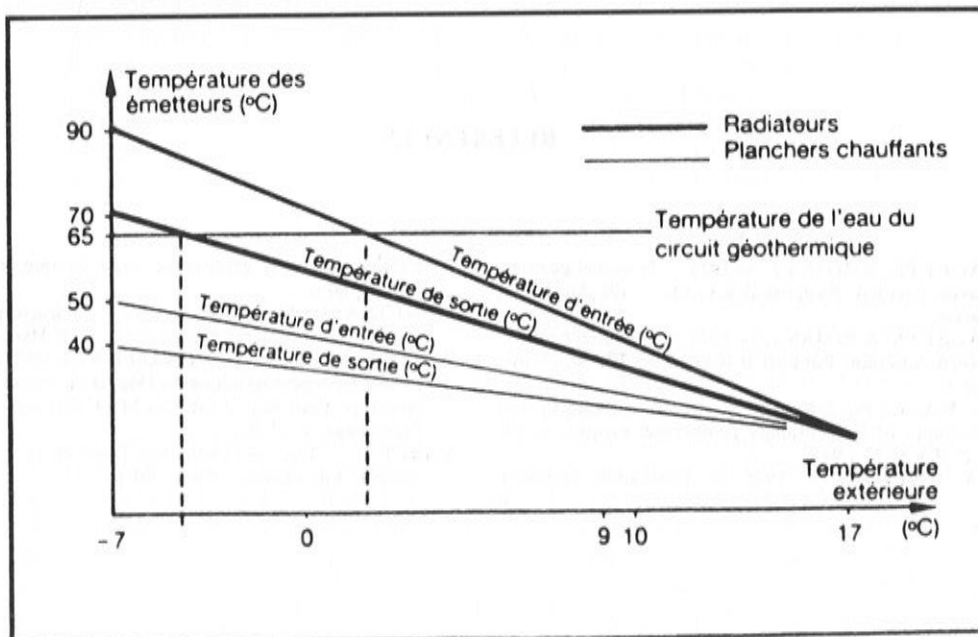


Figure 15 — Température d'entrée et de sortie des émetteurs en fonction de la température extérieure.

Les autres besoins de chaleur que la géothermie peut satisfaire sont la production d'eau chaude sanitaire. Elle a lieu 365 jours/an et représente du point de vue thermique 25 à 35% des consommations de chauffage.

BILAN ENERGETIQUE ET ECONOMIQUE

Du point de vue énergétique, la géothermie pour le chauffage urbain permet d'économiser de l'ordre de 1 Tep/an par équivalent logement. Une opération qui capte des ressources supérieures à 70°C et avec des débits de l'ordre de 200 m³/h permet ainsi d'économiser de 2500 à 4000 Tep/an. Cette économie est calculée à partir de l'énergie fossile substituée, diminuée de l'énergie électrique fournie pour les pompages.

Du point de vue économique, un projet de géothermie se caractérise par la lourdeur des investissements. L'utilisation directe de la chaleur, avec les technologies actuelles, concerne préférentiellement des niveaux de température de l'ordre de 50°C à 80°C, ce qui impose d'aller chercher la ressource à plus de 1500 m de profondeur, donc de réaliser des forages profonds et coûteux. Une opération géothermique au Dogger représente un investissement de l'ordre de 30 à 50 millions de francs. Le bilan économique d'une opération s'établit cas par cas. Il varie selon les caractéristiques de la ressource (profondeur, température, débit, etc.) et celles de besoins de surface (nombre de logements raccordés, type de réseau). Le Tableau 1 présente les caractéristiques techniques et économiques d'une opération géothermique moyenne dans le Bassin parisien.

Tableau 1 — Caractéristiques Principales D'une Installation Type Au Dogger Dans Le Bassin Parisien

Profondeur du toit du réservoir :	1 630 m
Température en tête de puits :	68°C
Débit d'exploitation en pompage : (Puissance de la pompe immergée = 130 kw)	220 m ³ /h
Pourcentage des besoins couverts par la géothermie :	68%
Nombre de TEP économisées par an :	3 100
Investissement H.T.	41 MF
Part de l'investissement sous sol :	48%
Investissement H.T. par TEP économisée :	13 500 F/TEP économisée
Nombre d'équivalents logements raccordés :	3 000 équivalents logements

REFERENCES

- HOUSE B., MAGET Ph. & ROJAS J. — 1976 — Potentiel géothermique du Bassin parisien. Rapport B.R.G.M. — Elf Aquitaine, 125 p., 30 cartes.
- HOUSE B., MAGET Ph. & ROJAS J. — 1977 — Potentiel géothermique du Bassin Aquitain. Rapport B.R.G.M. — Elf Aquitaine, 167 p., 38 cartes.
- LEJEUNE J.M., MAGET Ph. & ROJAS J. — 1980 — Technical and economic feasibility of low enthalpy geothermal projects in the EEC. Rapport B.R.G.M., 94p.
- LEMALE J. & PIVIN M. — 1986 — Evaluation technico-économique de la géothermie basse énergie en France. Rapport AFME, 80 p.
- MENJOZ A. & SAUTY J.P. — 1982 — Characteristics and effects of geothermal resources exploitation. J. of Hydrology, 56, 49-59.
- ROJAS J., FOUILLAC C., GARBLE R. & MENJOZ A. — 1984 — Le réservoir géothermique du Dogger en région parisienne: exploitation, gestion. Bull. du B.R.G.M., Hydrogéologie — Géologie de l'Ingénieur, 1, 57-85.
- VARET J. — 1982 — Géothermie basse énergie: usage direct de la chaleur. Ed. Masson, Paris, 201 p.