

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.

B.P. 6009

45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.

27, Rue Louis Vicat

75015 PARIS

- METHODOLOGIE DE L'EXPLORATION HAUTE ENERGIE -

- Document provisoire -

C O N F I D E N T I E L

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

METHODOLOGIE DE L'EXPLORATION GEOTHERMIQUE HAUTE ENERGIE

OBJECTIFS :

Les méthodes employées actuellement pour l'exploration géothermique sont, soit directement adaptées de méthodes mises au point par d'autres finalités, soit en cours d'évaluation beaucoup plus qu'une période d'application routinière.

La conséquence à l'heure actuelle en est, qu'à l'exception de cas évidents liés à des manifestations superficielles intenses, les résultats d'exploration de surface avant forages prêtent souvent à controverse.

MOYENS :

Nous sommes proposés dans un premier temps d'aborder séparément les trois grands domaines techniques de l'exploration Haute énergie suivants par l'intermédiaire d'équipes spécialisées.

- Méthodes géophysiques : du fait des coûts élevés des méthodes à sources d'émission artificielle, de leurs problèmes de mise en oeuvre et de leur faible pouvoir de pénétration nous avons développé l'utilisation de méthodes adaptées aux signaux naturels (magnétotellurique, audio-magnétotellurique, sismique).
- Méthodes géologiques : actuellement les méthodes géologiques utilisées visent surtout à la reconstitution de l'histoire volcanique de sites prospectés et moins à l'histoire thermique. Nous avons donc axés notre recherche sur les méthodes permettant l'évaluation du potentiel thermique.
- Méthodes géochimiques : notre recherche s'est orientée sur les buts suivants :
 - . augmenter le degré de fiabilité des méthodes géothermométriques classiques,
 - . utiliser la géochimie (Hg, gaz des sols...) pour cartographier les anomalies thermiques et pour comprendre les circuits hydrothermaux des zones prospectés.

Dès 1984, nous commencerons à établir les connexions entre ces différentes méthodes de façon à définir de véritables stratégies d'exploration intégrées faisant appel à des combinaisons optimisées de ces méthodes.

METHODOLOGIE EXPLORATION EN GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE

Méthodes géophysiques

A. BEAUCE

OBJECTIFS 1983

- Exploration profonde :

Mise au point d'une chaîne d'acquisition et de traitement multi-paramètres "in situ" de signaux naturels de fréquences comprises entre 200 Hz et 0.01Hz orientés sur la prospection géothermique haute énergie. Phénomènes analysés : magnétique, électrique et sismique.

- Exploration des milieux de couverture :

Amélioration de l'exploitation des méthodes audio-magnétotelluriques.

RESULTATS :

Etape d'initialisation, passant surtout cette année, par la mise en place de l'ossature de notre système, tant au plan technologique qu'informatique nous permettant ainsi rapidement l'acquisition de données.

- 1) Magnétotellurique : mise au point d'une première génération d'appareillage conduisant à une première mission expérimentale de 3 mois : 130 sondages effectués. Bon comportement du système. Interprétation en cours.
- 2) Sismique : Mise au point du logiciel d'acquisition et de détection de microséismes en temps réel. Localisation.
- 3) Audio-magnétotellurique :
Réinterprétation et synthèse des données recueillies au cours des campagnes 1981, 1982 et 1983 (200 sondages) sur : les champs de la Martinique : rapport final fin novembre 1983,
de la Réunion : publication au JVGR (acceptée) "Geothermal study of Réunion Island-AMT Survey."

1 - MAGNETOTELLURIQUE :

Objectifs :

Au cours de l'année 1983, une partie des travaux de la cellule de géophysique de l'IMRG se sont articulés autour de la mise au point et des essais opérationnels de la chaîne d'acquisition et de traitement "in situ" des signaux magnéto-telluriques et sismiques dans le cadre de l'action D.G.R.S.T. SIGNAUX NATURELS, associant l'IMRG, le laboratoire de Géophysique Appliquée de l'Université PARIS VI, et le Centre de Recherches Géophysiques de Garchy.

Le principe de la méthode magnéto-tellurique, les différents éléments de la chaîne d'acquisition et de mesure, ainsi que la lère génération de logiciels développés au cours du 1er semestre 83, sont détaillés dans les rapports d'octobre 82 et avril 83, rédigés au terme des deux premières étapes de cette action.

Le présent rapport décrit les tests effectués sur les logiciels d'acquisition et de traitement et la mise en oeuvre de l'ensemble, équipement et programmes. Celle-ci s'est effectuée en deux phases : sur le terrain d'abord, au cours de trois mois de campagne de mesure dans les îles de la Martinique et de la Dominique en laboratoire ensuite, lors du traitement des données recueillies sur le terrain.

Le bon comportement du matériel en opération et la qualité des premiers résultats obtenus confirment l'intérêt de l'utilisation d'un tel dispositif, en exploration tant géothermique que géophysique, et en particulier dans les terrains volcaniques.

RESULTATS

I - TEST ET AMELIORATION DES LOGICIELS DE TRAITEMENT

I.1 - DECIMATION

L'analyse spectrale du signal enregistré sur les 6 voies magnétiques et telluriques s'effectue selon la méthode de décimation (voir fig. 1).

Cette méthode et les programmes de traitements qui l'utilisent ont été décrits de façon détaillé dans le précédent rapport DGRST. Pour chaque fréquence, les moyennes des 12 puissances spectrales et des 66 produits croisés sont calculés à partir de toutes les estimations retenues après sélection des coefficients de Fourier obtenus. Les 100 premières estimations des coefficients de Fourier sont également stockées dans des fichiers utilisés ultérieurement pour différents types de test.

I.1a - TEST COMPARATIF DECIMATION HF-BF

Les programmes de décimation haute et basse fréquence ont été testés comparativement à l'aide d'un signal sinusoïdal produit par un générateur. Ce signal d'amplitude 1 Volt crête-crête et de période 1.24 sec. est situé dans la plage de fréquence où les gammes Haute et Basse Fréquence se superposent. Il a été échantillonné successivement avec les programmes d'acquisition HF et BF. Les résultats du calcul des puissances spectrales par décimation sont présentes sur la fig. 2. On note une bonne correspondance des valeurs HF et BF ainsi qu'un faible étalement du spectre autour du Pic théorique à 1.24S.

I.1b - DETERMINATION DES SEUILS DE BRUITS. DEFINITION DES CRITERES DE SELECTIONS

Afin de déterminer des critères de sélection pour les estimations successives des coefficients de Fourier, des enregistrements de bruits ont été effectués à Garchy. Pour les voies électriques, les électrodes ont été placés cote à cote. Pour les voies magnétiques plusieurs capteurs ont été placé parallèlement à quelques mètres de distances et un autre capteur a été placé dans une enceinte de μ -métal qui diminue l'amplitude du champ magnétique dans un rapport de 30. Les résultats présentés sur la fig. 3 nous ont permis de retenir les seuils de bruits suivants en dessous desquels les estimations de puissances spectrales sont rejetées :

	MAGNETIQUE γ^2	TELLURIQUE $(mV/Km)^2$
H.F.	$4 \cdot 10^{-7}$	10^{-5}
B.F.	$4 \cdot 10^{-7}$	10^{-5}
	$4 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}

I.1c - TEST SUR LES COHERENCES

Des essais de sélection des estimations des coefficients de Fourier ont été effectués avec des critères basés sur les cohérences entre voies magnétiques parallèles de 2 stations différentes :

$$\frac{|\overline{H_x H_x^*}|^2}{|H_x|^2} \text{ et } \frac{|\overline{H_y H_y^*}|^2}{|H_y|^2}$$

Toutes les estimations pour lesquelles plus de 2 cohérences sur les 6 calculées étaient inférieures à 0.5 ont été rejetées. Lorsque ce type de sélection est appliqué sur un sondage dans lequel une station est sensiblement plus bruitée que les 2 autres, il présente l'inconvénient d'éliminer un grand nombre d'estimations correctes pour les 2 stations les moins bruitées et réduit donc la qualité du résultat final pour ces 2 stations. Ce type de test n'a donc pas été retenu pour le traitement de fichiers de données. En revanche il pourra être envisagé lors de traitement en temps réel où le nombre d'estimations disponible ne sera pratiquement pas limité.

I.2 - CALCUL DES PARAMETRES MAGNETO-TELLURIQUES A PARTIR DES PUISSANCES SPECTRALES ET DES PRODUITS CROISES

Deux types de logiciels sont actuellement opérationnels :

- le programme "NARCISSE" qui calcule les tenseurs d'impédance classiques et les tenseurs d'impédance avec référence éloignée (décrit dans le rapport D.G.R.S.T, avril 83)

- des programmes de calcul des résistivités apparentes à partir des moyennes des rapports des spectres des composantes électriques et magnétiques orthogonales d'une même station. Calculé à partir des 100 premières estimations des coefficients de Fourier stockées lors de la décimation. On notera que ce mode de traitement ne donne de résultat satisfaisant que dans les cas assimilables au cas tabulaire . Il a été essentiellement utilisé à titre de test et pour sortir rapidement des résultats préliminaires sur les données Antillaises.

Afin de tester dans son intégralité le programme "Narcisse" un cas synthétique a été réalisé à partir d'un tenseur d'impédance Z obtenu sur un milieu tabulaire constitué de 2 couches dans lequel la 1ère couche présente une anisotropie de résistivité :

couche 1 : épaisseur 500 m $\rho_{1x} = 100 \Omega\text{m}$ $\rho_{1y} = 10 \Omega\text{m}$

couche 2 : $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$

A partir d'un pseudo-champ initial (Hx, Hy) obtenu à l'aide des fonctions aléatoires internes au calculateur. Les spectres et produits croisés ont été calculé en rajoutant un bruit aléatoire (S/B ~ 10) sur chaque composante.

Ces données synthétiques nous ont permis de tester tous les segments du programme "Narcisse" : calibration, rotation, calcul des tenseurs, calcul des directions principales, rapport signal/bruit cohérences, résistivités apparentes, phases. Les résultats sont présentés sur la fig. 4.

II - LES CAMPAGNES DE MESURES MAGNETO-TELLURIQUES EN MARTINIQUE ET DOMINIQUE

Après 2 mois d'essais au Centre de Garchy, cet équipement a été utilisé dans le cadre de l'étude géothermique des Antilles, pour une campagne de mesures magnéto-telluriques, qui s'est déroulée du 22/03 au 20/05 en Martinique. Deux zones ont été retenues : les flancs SW, S et E de la Montagne Pelée (communes de St-Pierre, Morne Rouge, Ajoupa-Bouillon et Basse Pointe), et la rive S de la baie de Fort-de-France (communes de Ducos, Rivières Salée et Trois Ilets).

Il a été relevé (figs. 5 et 6) :

- 30 triplets de stations, soient 90 stations dans la partie N de l'île (Morne Rouge), avec comme buts précis l'étude du graben de Champflore-Morne Rouge et le recoupement d'un possible accident NE-SW repéré par D. WESTERCAMP sur photos aériennes, au N de la Montagne Pelée. En règle générale, l'interprétation préliminaire sur le terrain semble confirmer l'existence des conducteurs superficiels détectés en M.T. haute fréquence (A.M.T.) mais n'indique pas de conducteurs plus profonds, à l'exception des sondages situés sur les flancs de la Montagne Pelée.

- 4 triplets de stations, soient 12 stations, dans la zone du Lamentin, pour laquelle les arguments en faveur de la présence d'une cible géothermique sont plus nombreux qu'au Nord de l'île. Là aussi, les résultats de l'A.M.T. sont corroborés dans les premières centaines de mètres.

Faisant suite à cela, une deuxième campagne de prospection a été réalisée dans le Sud de l'île de la Dominique, du 23/05 au 25/06. Le but de l'opération était de préciser les possibilités d'existence d'un réservoir géothermique à l'Est de Roseau et de compléter ainsi les études géophysiques, géologiques et géochimiques menées à bien les années antérieures.

Malgré quelques problèmes dans le déroulement pratique de la campagne, 11 triplets de stations ont été relevés, dans des conditions satisfaisantes, si l'on tient compte du fait que le matériel venait d'être utilisé les 2 mois précédents en Martinique (fig. 7).

Les résultats préliminaires sur le terrain indiquent la présence d'un conducteur superficiel déjà décelé en audio-M.T. dans la zone de Wotten Vaven. Parallèlement aux sondages M.T. basse fréquence, 13 sondages d'audio-M.T. ont été effectués pour compléter la couverture déjà existante.

III - TRAITEMENT DES DONNEES RECUEILLIES EN MARTINIQUE ET DOMINIQUE

A partir du calcul des spectres de puissance et de puissance croisée, différentes méthodes permettent d'estimer la courbe de résistivité apparente en fonction de la période, paramètre fondamental de l'interprétation M.T. Sur les figures 8 et 9, 3 méthodes de calcul de pa sont comparées, en utilisant les données de la station 3 de Château Lézards, dans la plaine du Lamentin :

- 1) à partir de la moyenne logarithmique des rapports des spectres de puissance des champs magnétiques et telluriques perpendiculaires (100 estimations maximum) ;
- 2) à partir de l'estimation classique du tenseur d'impédance $[Z]$:
- 3) à partir de l'estimation du tenseur d'impédance $[Z^T]$ avec référence éloignée, méthode la plus employée actuellement.

De plus, les résultats des mesures audiomagnéto-telluriques, effectuées à l'aide du résistivimètre ECA, sont reportées pour permettre la comparaison avec les résultats de même fréquence.

Dans ce cas précis, nous pouvons observer une bonne similitude entre les courbes obtenues par les méthodes 1 et 3 (figures 8a et 8c, 9a et 9c), ainsi que des résultats semblables en haute-fréquence à ceux du résistivimètre. Les figures 8b et 8c, 9b et 9c montrent un cas d'emploi efficace de la référence éloignée : la partie basse-fréquence des courbes obtenues avec la méthode 2, est notablement améliorée par la corrélation avec la référence (méthode 3).

Actuellement, ce type de traitement est en cours sur l'ensemble des données, ce qui devrait permettre de donner un premier modèle géoélectrique du sous-sol des zones étudiées.

IV - PREPARATION DE LA 2ème GENERATION DE MATERIEL

Un certain nombre de modification de la partie analogique, déduite de l'expérience des 2 missions sur le terrain, est en cours de réalisation. En ce qui concerne les logiciels, il est prévu d'utiliser des langages plus rapides et plus performant que le Basic, permettant le calcul des paramètres M.T., parallèlement à l'acquisition. Le but recherché est de pouvoir prolonger l'acquisition jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants à certains critères de sélection ; par exemple, en éliminant au fur et à mesure les estimations n'améliorant pas la cohérence, ni les barres d'erreurs sur les résistivités apparentes.

Un certain nombre de sous-programme a, d'ores et déjà, été réalisé, en Pascal qui présente l'avantage de pouvoir être utilisé sur H.P. à partir du Basic, le gain de temps est de l'ordre d'un facteur 3 à 4.

CONCLUSION

Au cours de l'année 83, la chaîne d'acquisition et de traitement des données M.T. a été assemblée, testée et utilisée avec succès au cours de deux missions outre-mer. La fiabilité de l'appareillage électronique, tant analogique que numérique, et le fait que la 1ère génération de logiciels soient utilisés en routine, indiquent que la plupart des objectifs fixés dans l'action D.G.R.S.T. sont atteints.

La remise des rapports des campagnes Martinique et Dominique, au Ministère de l'Industrie, commanditaire des deux études, marquera la conclusion de la première étape de travail sur la méthode magnéto-tellurique, au cours de laquelle nous sommes passés en 1 an du stade de la réception du matériel à celui de la production d'interprétations des mesures sur le terrain.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES LOGICIELS DE DECIMATION

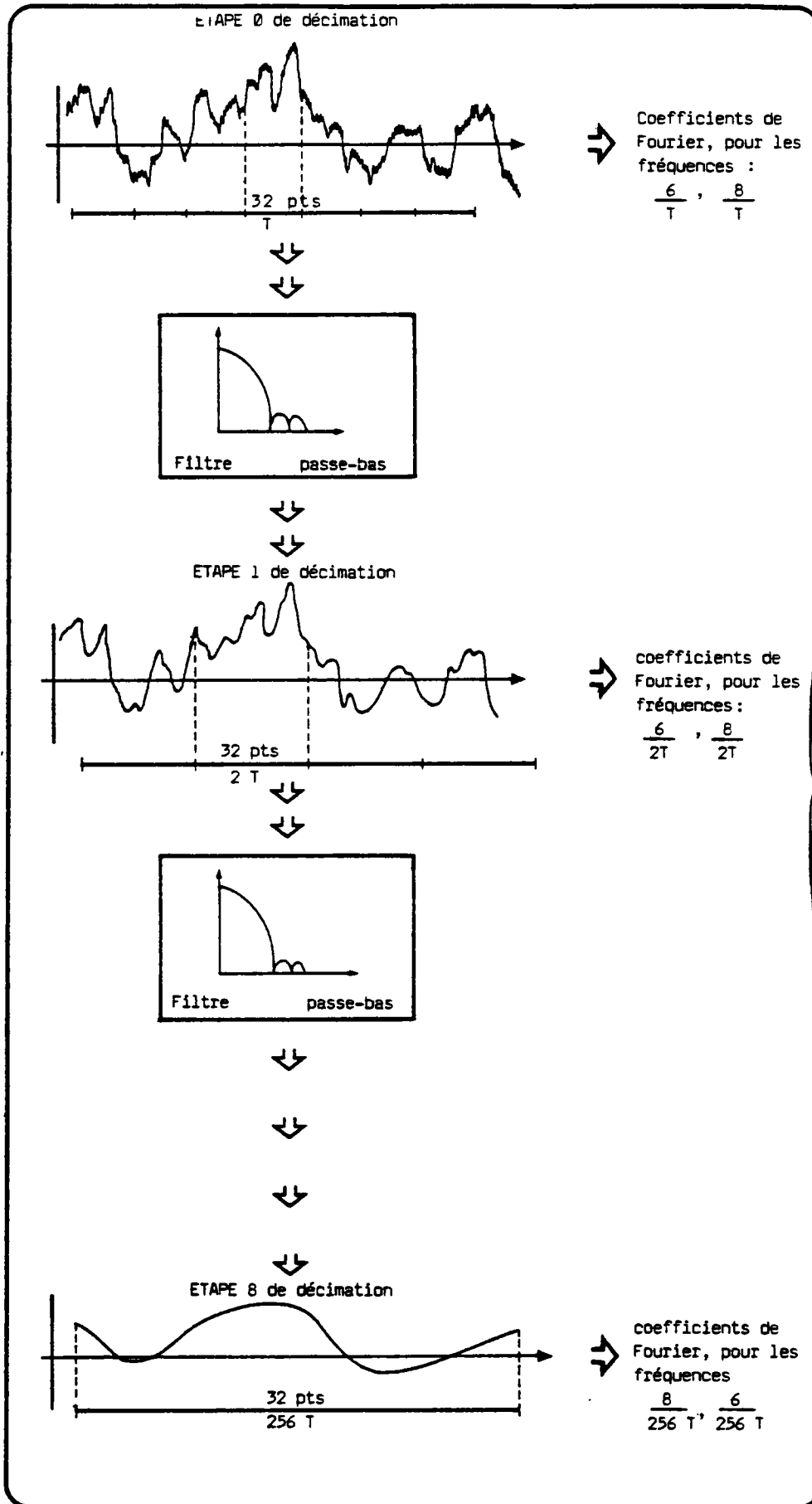


FIGURE 1

CALCUL DES MOYENNES DES PUISSANCES SPECTRALES ET PRODUITS CROISES

STOCKAGE DES 100 PREMIERS ESTIMATIONS DES COEFFICIENTS DE FOURIER POUR CHAQUE FREQUENCE.

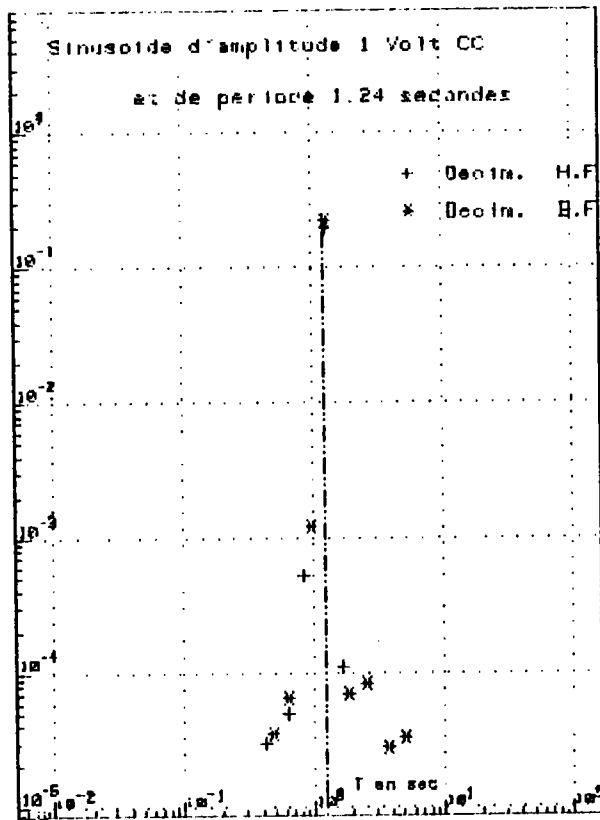


FIGURE 2

PUISSANCES SPECTRALES
DES ENREGISTREMENTS DE BRUIT

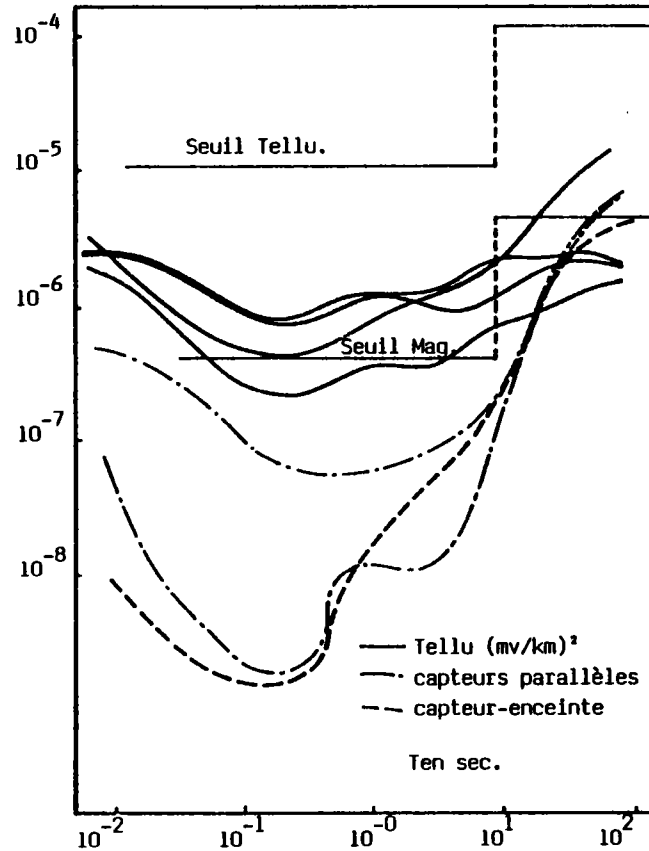


FIGURE 3

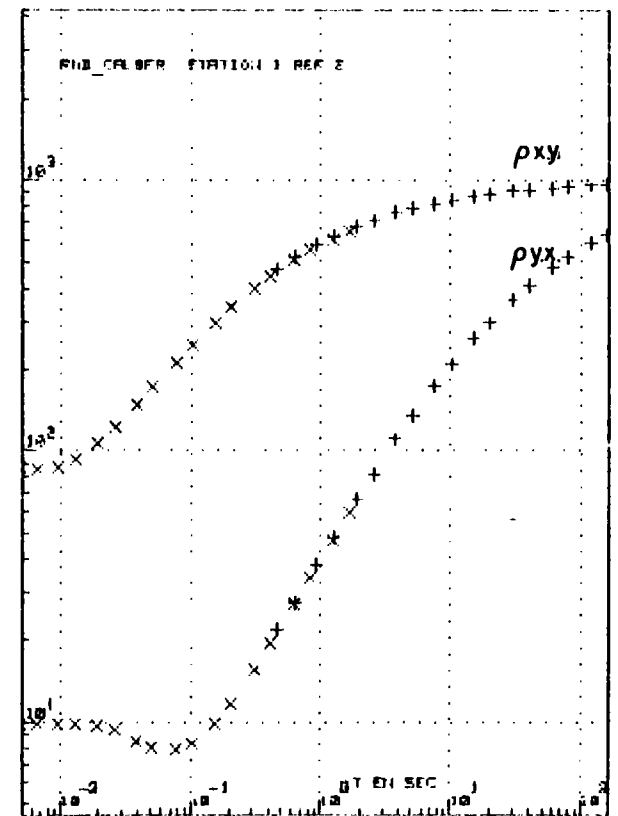
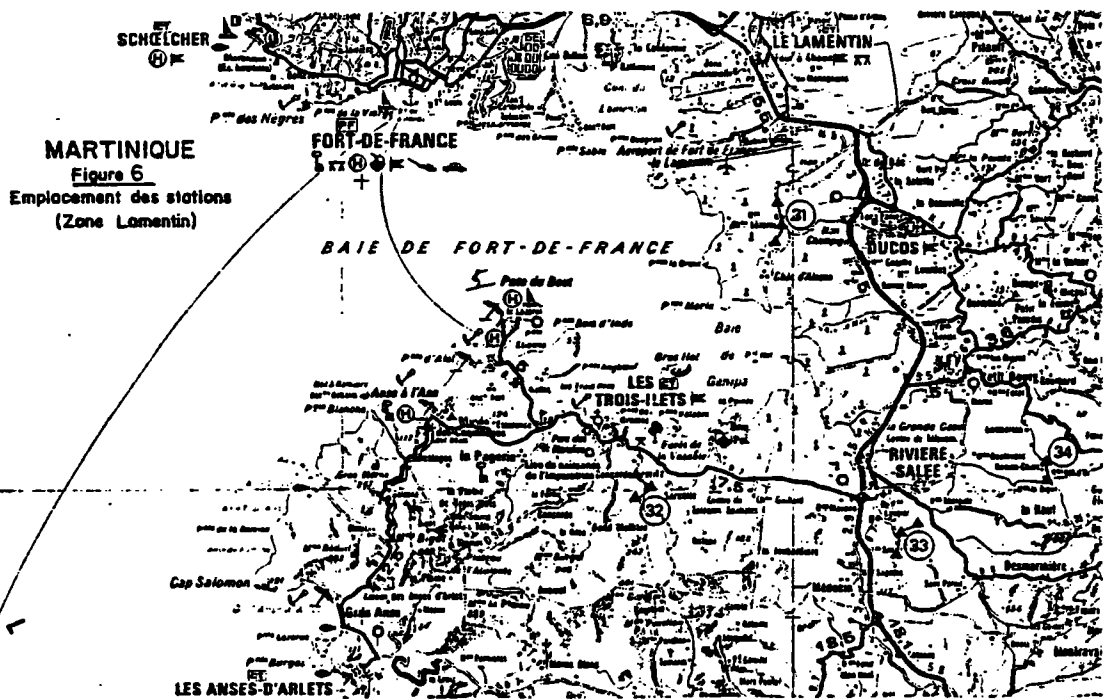
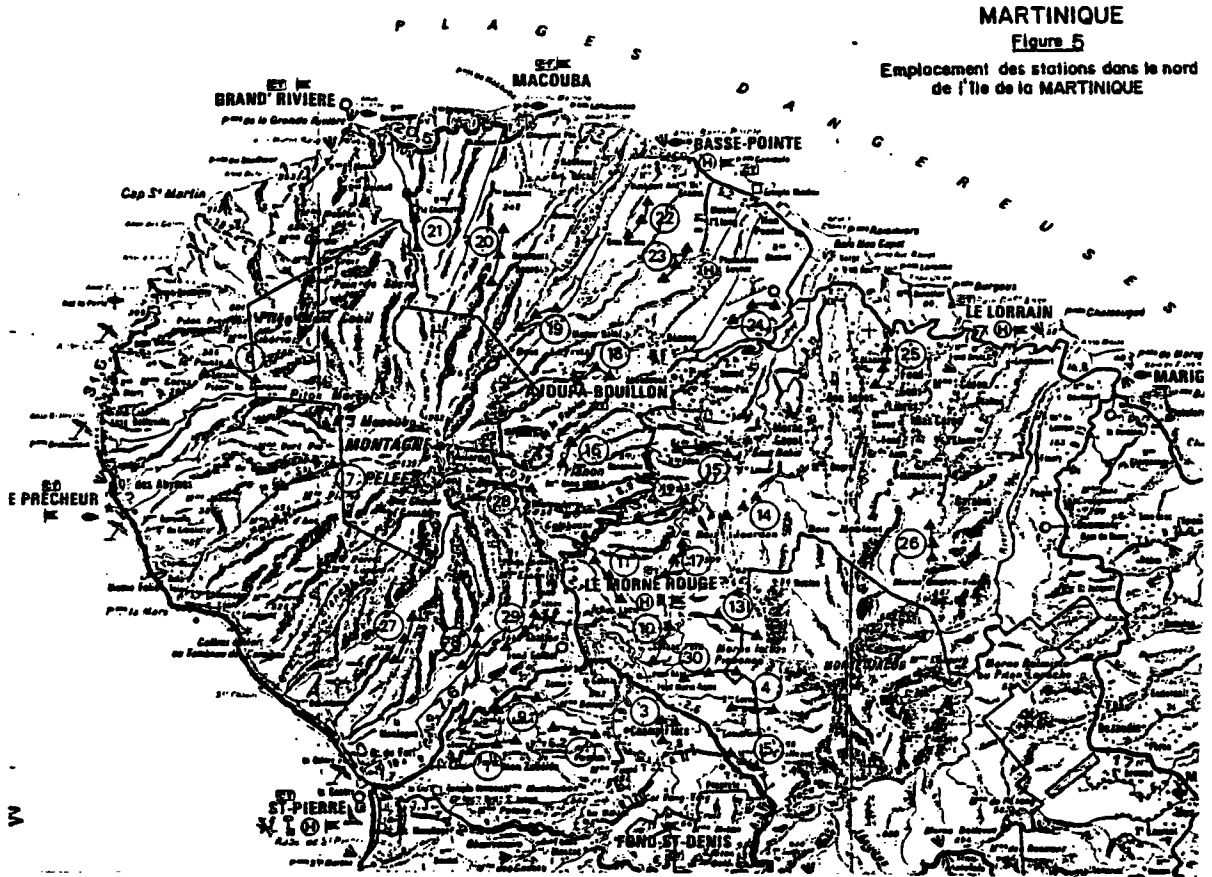
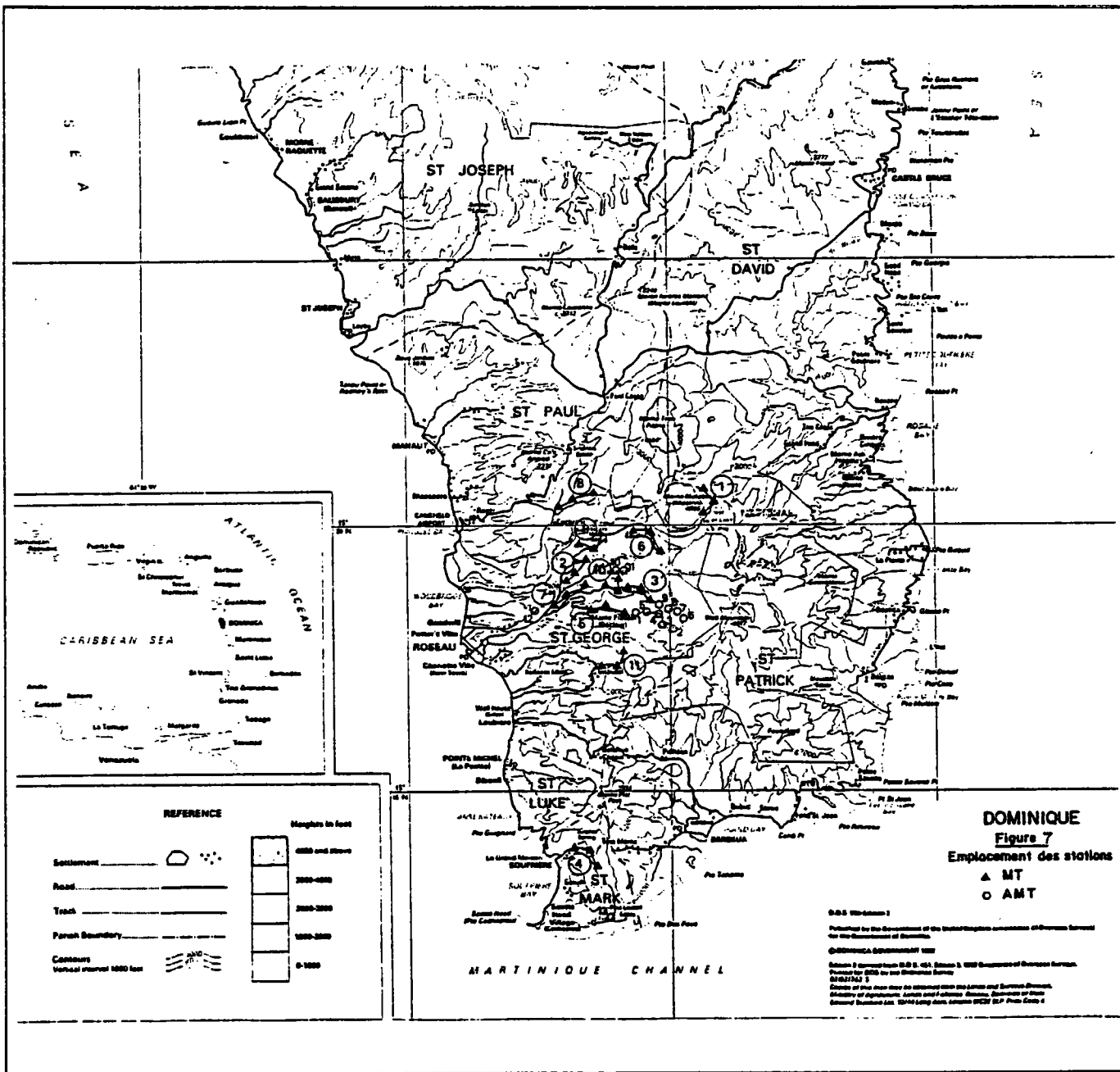


FIGURE 4





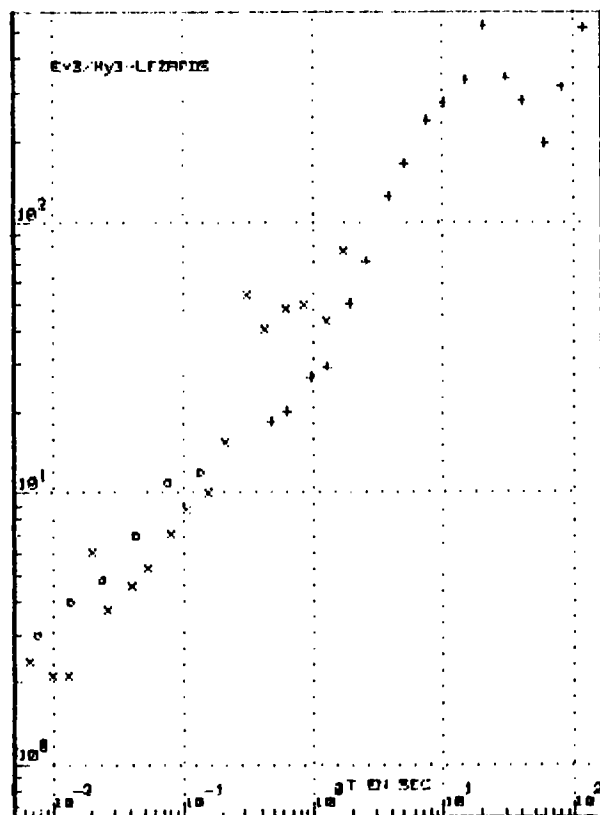


FIGURE 8a: Resistivite apparente selon la methode 1 (direction NS.) Station 3 Chateau Lezards

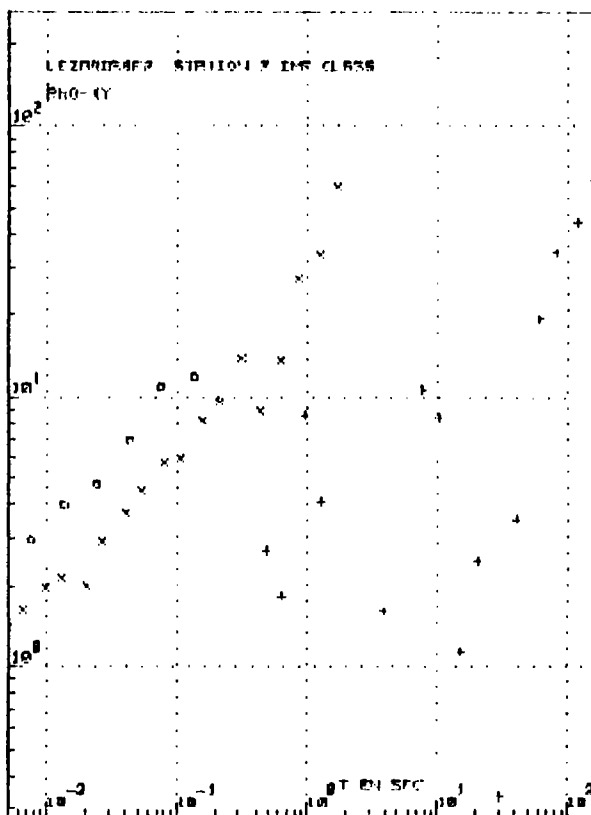


FIGURE 8b: Resistivite apparente selon la methode 2 (direction NS.) Station 3 Chateau Lezards

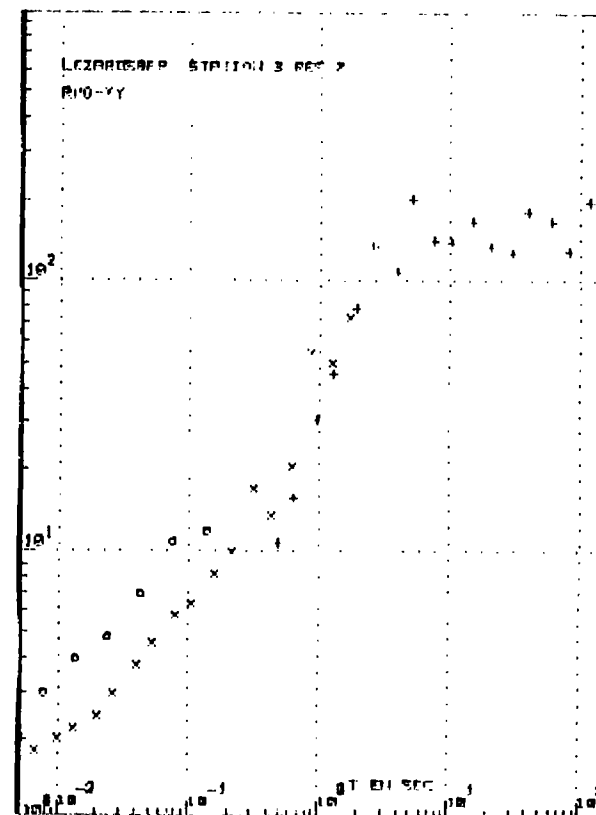


FIGURE 8c: Resistivite apparente selon la methode 3 (direction NS.) Station 3 Chateau Lezards

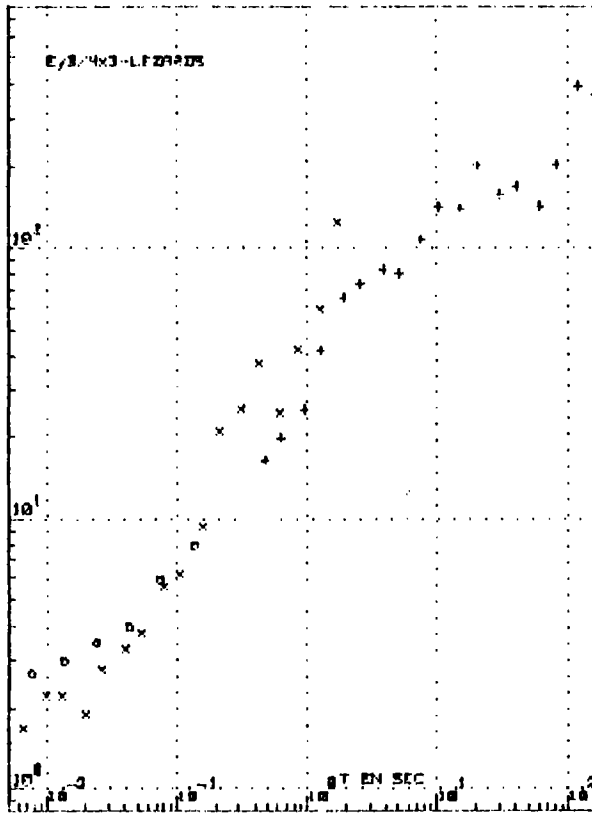


FIGURE 9a: Resistivite apparente selon la methode 1 (direction EW.) Station 3 Chateau Lezards.

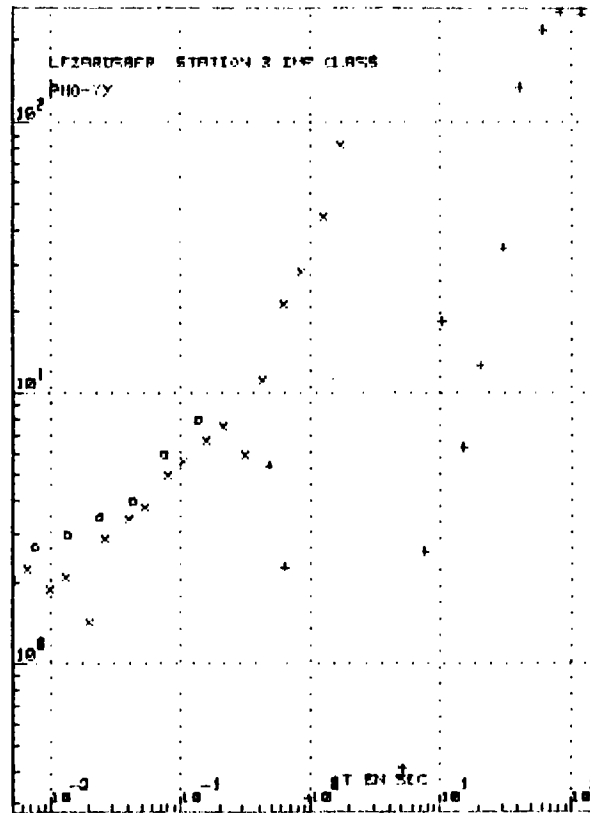


FIGURE 9b: Resistivite apparente selon la methode 2 (direction EW.) Station 3 Chateau Lezards.

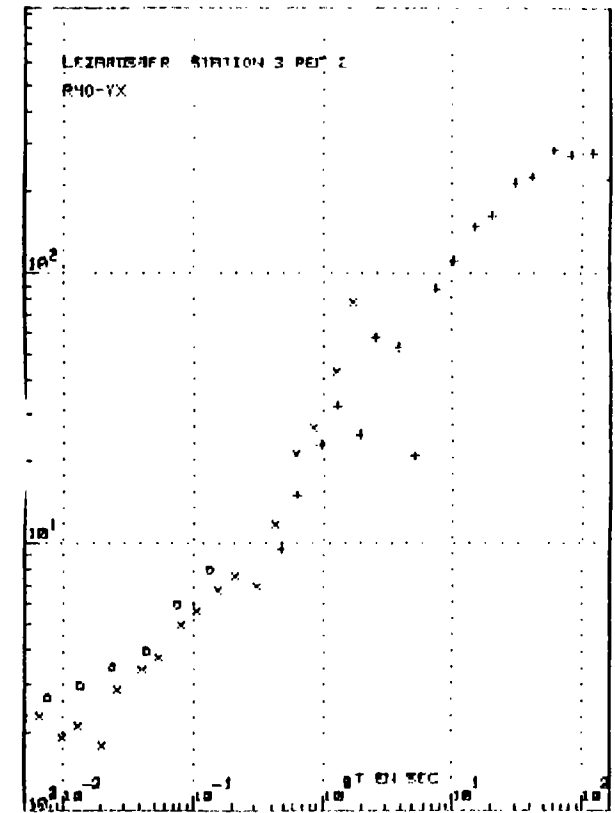


FIGURE 9c: Resistivite apparente selon la methode 3 (direction EW.) Station 3 Chateau Lezards.

2 - SISMIQUE (A. BEAUCE)

Objectif :

Depuis quelques années, l'écoute sismique passive sur sites géothermiques haute énergie prend une ampleur grandissante, du fait de son faible coût et d'une relative facilité d'implantation vis-à-vis des méthodes sismiques réflexions et réfractions. Les méthodes envisagées pour cerner une éventuelle cible géothermique font appel à trois types d'approches :

A - L'écoute du bruit de fond sismique naturel :

De mise en oeuvre relativement aisée, cette méthode peut permettre de détecter et de cartographier les contours d'éventuelles recrudescences de niveau d'amplitude dans certaines gammes de fréquence (associées à une circulation de fluide à haute température et pression) pouvant aider à la localisation du réservoir.

B - La microsismicité locale :

Les aires géothermiques haute énergie étant souvent situées sur des zones de failles actives, l'étude des microséismes (localisation, mécanisme au foyer...) apporte des informations sur le système pouvant véhiculer le fluide vers la surface.

C - La sismicité mondiale :

La Terre étant continuellement secouée par des séismes, ceux-ci sont autant de sources génératrices d'ondes emmagasinant dans leur mémoire l'information du sous-sol. Les renseignements tirés de ces événements peuvent permettre de mettre en évidence des anomalies de vitesses ou d'absorption, elles-mêmes pouvant être liées à la présence d'un site géothermique.

L'objectif que nous nous sommes fixés, conjointement à celui de l'analyse des phénomènes magnétotelluriques, est de concevoir un système d'écoute sismique capable d'une part de faire l'acquisition des données, et d'autre part de leur appliquer certains traitements en temps réel (détection, localisation).

Les approches envisagées par l'utilisation de ce système dans le cadre de la projection géothermique haute énergie, soit du type a) et b) ; la dernière méthode d'analyse nécessite une immobilisation du réseau dans le temps trop importante, et surtout, une taille de dispositif assez différente de celui dont nous disposons à l'heure actuelle. (A noter que les logiciels actuellement créés n'auraient pas à être totalement refondus pour ce type d'analyse).

RESULTATS EN 1983

L'année 1983 (second semestre) a vu le début des travaux d'élaboration de cet outil : elle a consistée essentiellement à une mise à niveau sur le plan des logiciels, et elle a entraîné des modifications du système déjà élaboré pour la MT sur le plan technique.

1 - SYNTHESE DU RESEAU

Nous présentons sur la figure 1, la configuration actuelle du réseau tel qu'il sera expérimenté, ainsi que le système informatique utilisé.

Les 15 capteurs sismiques (de fréquence de résonance 1Hz) sont reliés par câbles aux boîtiers de filtrage et d'amplification, eux-mêmes reliés à la chaîne informatique.

Caractéristiques techniques de l'appareillage

Sismos : 9 capteurs 1Hz verticaux + 6 horizontaux.

Boîtier d'amplification et de filtrage : Gain 100 à 100.000,
Filtre anti-aliasing : 27 Hz (Butterworths à 36 db/o).

Chaîne d'acquisition : HP 9826 (1 Mø mémoire centrale : 16 bits)
Convertisseur A/D dynamique 72 db.
Unité de stockage : temporaire : Winchester 4.6 Mø
permanent : Floppy 1.2 Mø.

Alimentation sur groupe électrogène 1.2 KVA.

(pour de plus amples informations voir également le 2ème rapport DGRST signaux naturels.

2 - LOGICIEL

Le logiciel (écrit en BASIC), dont l'organigramme est donné sur la FIGURE 2, est basé sur trois ensembles principaux :

- programme de détection en temps semi-réel ;
- programme de localisation ;
- bibliothèque de programmes comprenant :
 - . programme d'acquisition de bruit de fond,
 - . programme de filtrage (FIR),
 - . estimation spectrale par périodogramme lissé.

2.1. - Programme de détection de séismes en temps semi-réel

(Occupation mémoire 600 Kø) (Taille mémoire du programme 50 kø).

Le principe de fonctionnement du système est le suivant : l'acquisition des données sur ordinateur se fait actuellement dans trois zones mémoires (buffers), cycliques, correspondant à une durée d'une minute de signal environ sur 15 voies échantillonnées à 100 Hz, la détection opérant sur une zone pendant que l'acquisition s'effectue dans la suivante : ainsi la détection est qualifiée "en temps semi-

réel" dans la mesure où la confirmation de la présence d'un évènement n'est annoncée qu'une minute après son existence effective.

L'algorithme de détection utilisé est basé à partir du rapport de la valeur absolue moyenne de l'amplitude du signal sur une petite fenêtre d'analyse, sur celle déterminée sur une grande fenêtre : soit γ le rapport ; si les (x_i) définissent les échantillons on aura :

$$\gamma = \frac{M \sum_{i=1}^N |x_i|}{N \sum_{N-M+1}^N |x_i|}$$

Le critère de détection sera déclaré vrai lorsque ce rapport dépassera n fois ce seuil.

Actuellement, et ceci de façon à éviter au mieux un certain nombre de fausses alarmes dues aux bruits environnant, la détection ne sera déclarée valide que dans la mesure où trois stations du réseau se mettent en cet état, ceci pendant une durée prédéfinie (1s en standard) et dans un intervalle de temps entre stations également fixé (2s en standard).

La détection étant confirmée le système prévoit le stockage sur disque Winchester des 15 voies (15 s avant la lère détection et 15 s après) ; si l'évènement dure plus de 15 s, une routine d'analyse du niveau du seuil de la coda permet, s'il est dépassé de sauvegarder les 30 s suivantes ; le système retourne ensuite en état de détection normale.

La capacité de stockage actuel permet une sauvegarde de 48 évènements simples : lorsque cette unité est pleine le programme est arrêté pour initialiser la sauvegarde sur floppy en mettant en alerte l'opérateur.

L'ensemble des détails concernant ce programme sera fourni dans le rapport annuel ; (nous présentons à titre indicatif sur la figure 3 un exemple de réponse du système sur une voie, en temps différé, à un tir de dynamite.

2.2. - Programme de localisation

(Occupation mémoire du programme 110 kø).

Il est très largement inspiré du programme HYP071 (Lee and Lahr - USGS 1975). Depuis de nombreuses années il est utilisé dans le monde pour l'analyse des données sismiques locales (tant au niveau localisation que magnitude, mécanisme au foyer) et nous l'avons choisi pour nous permettre d'homogénéiser nos résultats avec les résultats internationaux.

Dans ces grandes lignes, l'algorithme utilisé est le suivant : soit un réseau de n stations S_i dont les coordonnées sont (x_i, y_i, z_i) où l'on observe les temps d'arrivée d'ondes sismiques notées τ_i .

soit t_i le temps d'arrivée théorique basé sur un modèle de croûte choisi et pour une solution d'essai (c'est à dire pour une heure origine fixée t_0 , hypocentre de coordonnée (x_0, y_0, z_0)). Le terme résiduel s'exprime sous la forme :

$$e_i = \tau_i - t_i$$

Si le terme e_i est suffisamment petit, le développement en série de Taylor nous donnera :

$$e_i = dt_0 + \frac{\partial t_i}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial t_i}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial t_i}{\partial z_0} dz_0 + e_i$$

Pour un modèle de croûte donné, le temps de propagation et ses dérivées seront accessibles et on obtiendra un vecteur d'ajustement dto , dxo , dyo , dzo par moindres carrés tel que :

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 \text{ soit minimum.}$$

Les équations normales correspondant à la solution de minimisation forment un système à 4 équations pour 4 inconnues dxo , dyo , dzo et dto et peuvent être résolues.

Ces paramètres étant obtenus, on réitère le processus avec un nouvel hypocentre ($xo + dxo$, $yo + dyo$, $zo + dzo$, $to + dto$) jusqu'à ce que le système converge ou qu'un critère maximum d'itération soit satisfait.

Ce programme ne peut être utilisé dans l'optique d'une localisation d'évènements en temps réel ; mais il nous permet d'ors et déjà de pouvoir localiser des séismes au laboratoire.

2.3. - Bibliothèque de programme

Un certain nombre d'autres logiciels annexes dont le détail des procédures sera fourni dans le rapport annuel ont également été implantés sur notre calculateur (programme de filtrage numérique, d'estimation spectrale...) préparant aussi les futures analyses en laboratoire que nous aurons à effectuer.

CONCLUSION

A l'heure actuelle, le système, dans sa configuration sismique, ne peut être déclaré "opérationnel" dans la mesure où il n'a pas été testé en vraie grandeur.

Quoiqu'il en soit, la phase d'initialisation est maintenant dépassée. Dès la fin de l'année, une intervention sur les sites d'Haguenau, nous permettra de vérifier et d'affiner le fonctionnement de ce prototype.

En conclusion ultime, il est également important de noter que, de par l'esprit de sa conception, ce système ne se limite pas à une utilisation en prospection sismique appliquée à la géothermie mais sa souplesse lui permettra d'intervenir sur d'autres types d'études (crise sismique, phénomènes volcaniques,...).

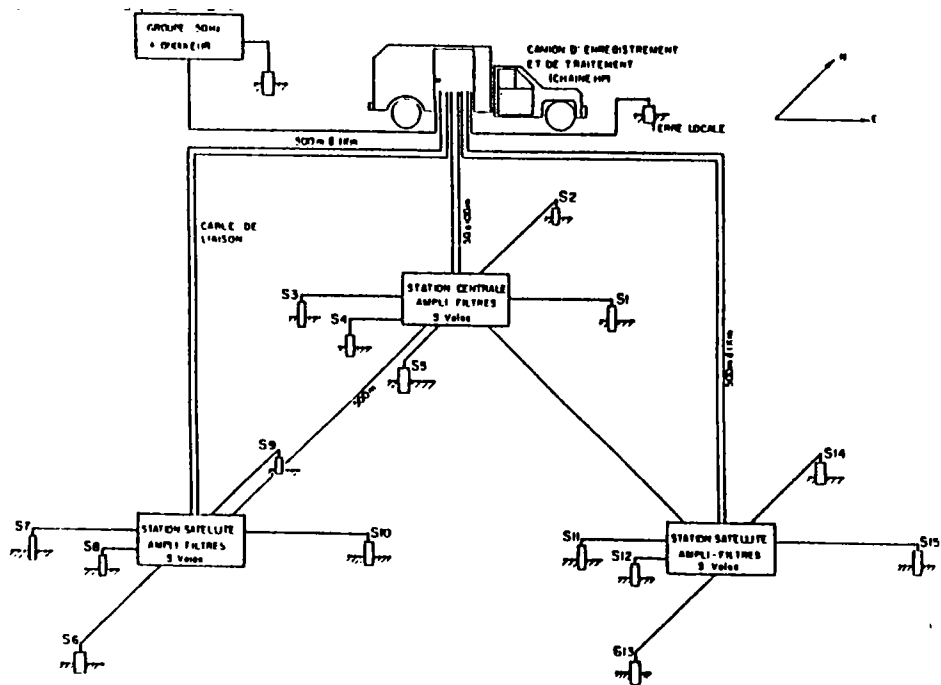
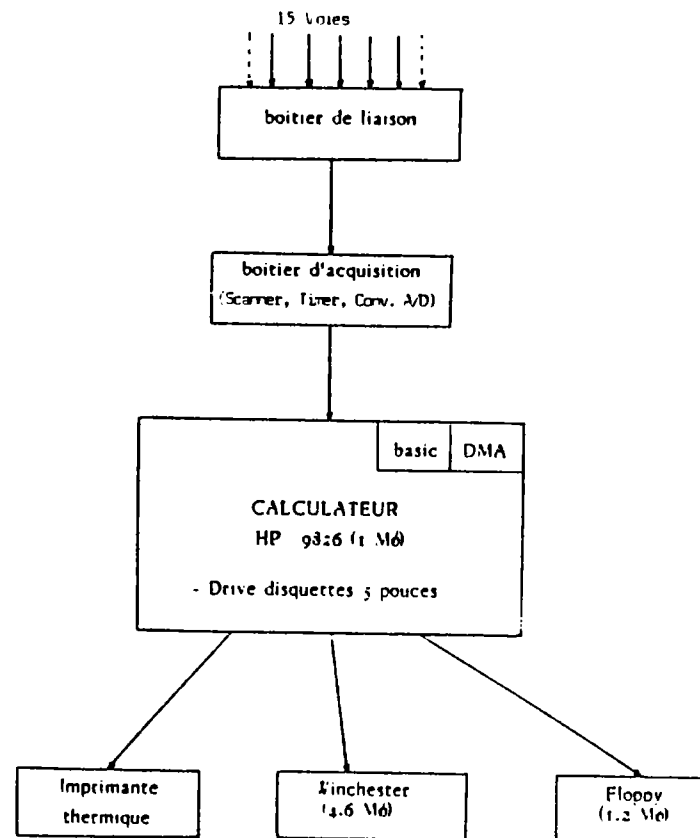


FIGURE 1



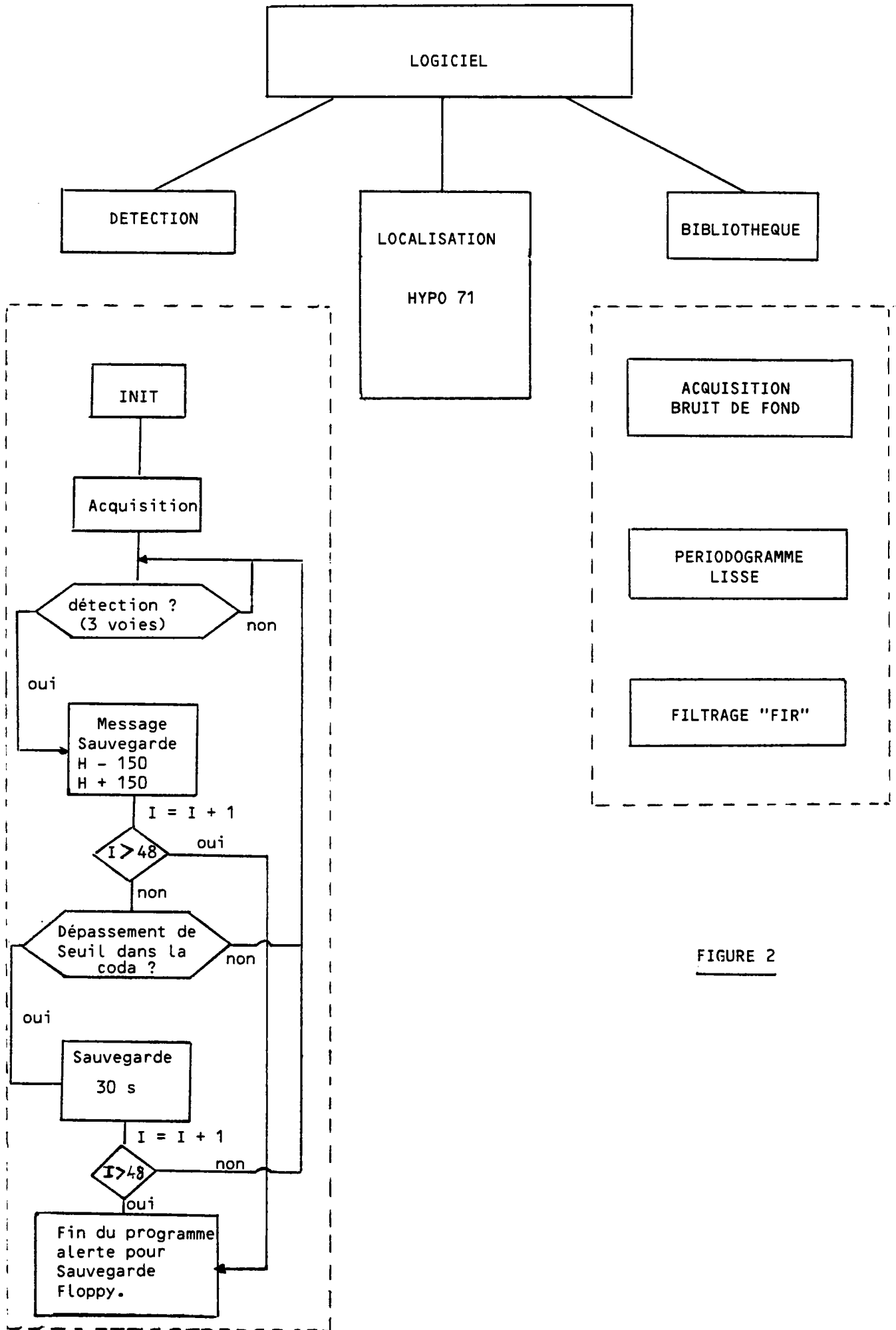
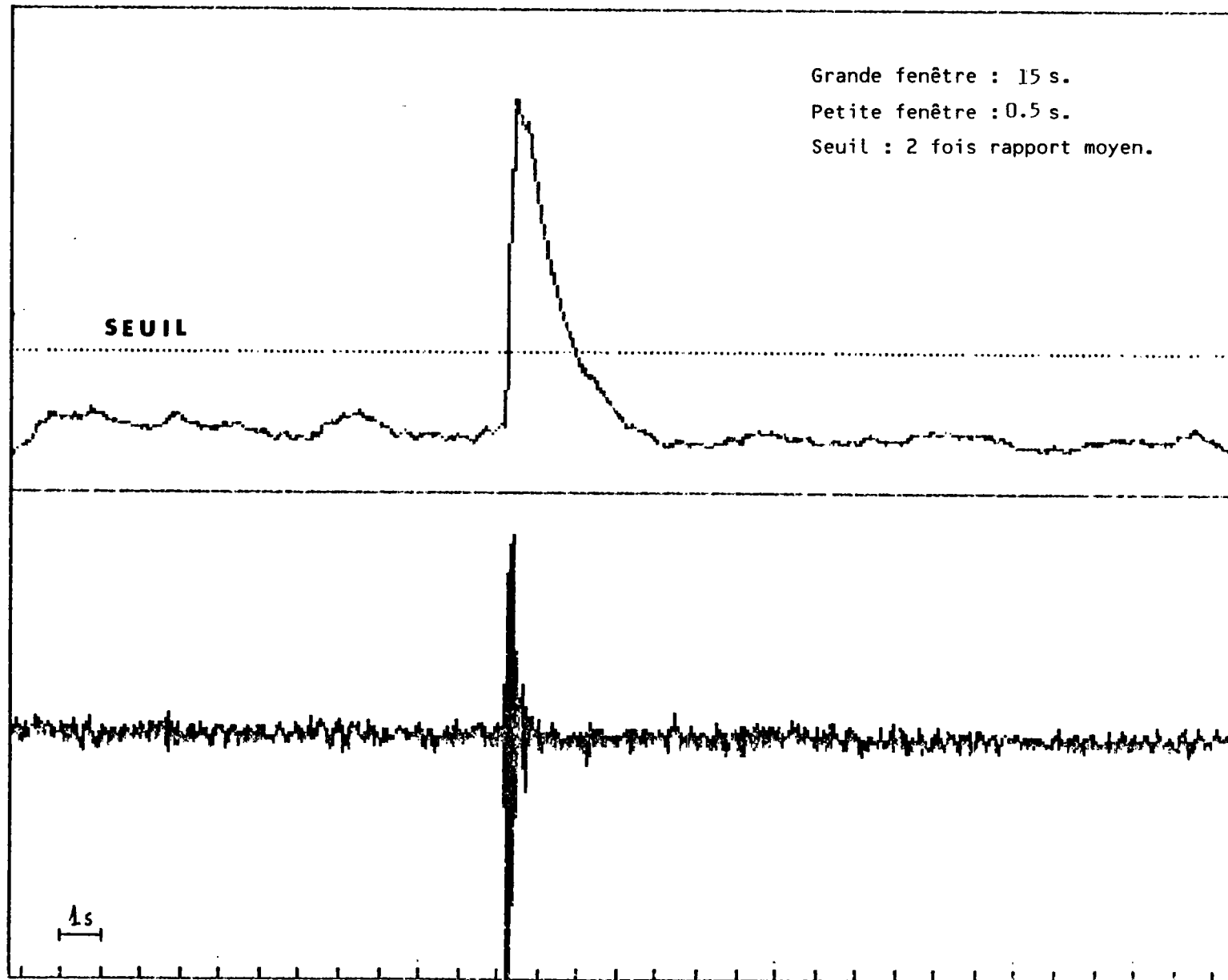


FIGURE 2

Figure 3



3 - AUDIO MAGNETOTELLURIQUE (Y. BENDERITTER)

Cette méthode caractérisée par une profondeur d'investigation moyenne (hectométrique à kilométrique) est développée pour l'exploration des milieux de couverture.

Objectif actuel

Définir et optimiser son rôle dans l'exploration des milieux de couverture en analysant principalement des données déjà existantes.

Résultats obtenus en 1983

Il est possible d'obtenir un modèle des terrains de type géophysique et en trois dimensions, ceci grâce à une forte densité des points de mesure qui permet une interprétation des données relativement simple.

Il semble possible de passer de ce modèle de type géophysique à un modèle de type géothermique donnant :

- la succession suivant la verticale de différents horizons (en général deux ou trois) dont quelquefois un horizon profond et très conducteur qui peut être assimilé à la couverture hydrothermalisée d'une éventuelle cible géothermique.

- l'extension dans le plan horizontal de ces différents horizons qui sont limités et décalés par des accidents structuraux. L'analyse des données dans les cas où la densité des points de mesure est suffisante, peut conduire à l'obtention d'une carte d'accidents structuraux qui peut aider à formuler certaines hypothèses sur l'alimentation en eau d'un éventuel gisement géothermique ou, par extrapolation vers le bas, sur des structures plus profondes.

Ces possibilités ont été mises en évidence par l'étude de données sur la Réunion (prospection de reconnaissance avec 535 sondages sur une surface d'environ 1000 km²) et sur la Martinique près de la Montagne Pelée (prospection plus détaillée avec 153 sondages sur une surface de 80 km²).

Dans ce dernier cas une cible géothermique a pu être décelée par la présence d'une couche très conductrice schématisée sur la figure ci-après. L'intérêt de cet indice est d'ailleurs renforcé par l'existence à cet endroit d'une anomalie gravimétrique locale lourde. Une hypothèse sur l'alimentation en eau de cette zone d'anomalies a été formulée à partir des conditions structurales. Elle permet d'ailleurs d'expliquer la limitation vers le NW de l'anomalie conductrice.

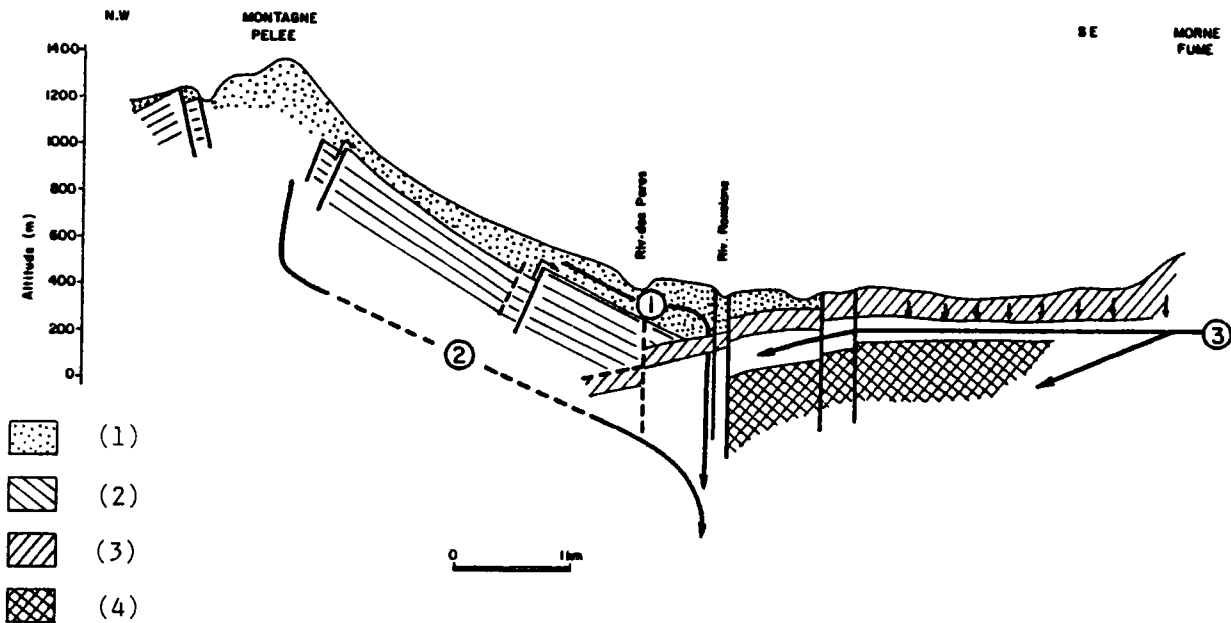
0 - 0 - 0 - 0 - 0

BIBLIOGRAPHIE

- "Geothermal study of Reunion Island. Audio magnetotelluric survey" - Y. BENDERITTER - A. GERARD. A paraître dans Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- "Investigation audio magnétotellurique et recherche d'une cible géothermique dans la région de Morne Rouge (Martinique)" - Y. BENDERITTER. Rapport BRGM à paraître.

AUDIO-MAGNETOTELLURIQUE

Modèle schématique proposé dans le cadre de la recherche d'une cible géothermique près de la Montagne Pelée (Martinique).



- (1) Pyroclastites récentes perméables.
- (2) Formations moins récentes et moins perméables.
- (3) Formations du Morne Jacob.
- (4) Couche conductrice trouvée en audiomagnétotellurique

① Trajet possible de l'eau.

En ce qui concerne la zone de couverture et uniquement du point de vue géophysique et hydrogéologique, on peut relever certaines analogies avec le gisement de Broadlands (Nouvelle Zélande).

METHODOLOGIE DE L'EXPLORATION EN GEOTHERMIE
HAUTE ENERGIE
METHODES GEOLOGIQUES

h. Traineau

RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROGRAMME 1983

. Les méthodes géologiques utilisées jusqu'à maintenant en exploration géothermique visaient essentiellement la reconstitution de l'histoire volcanologique des sites prospectés. L'histoire thermique par contre est beaucoup moins bien appréhendée, bien qu'essentielle dans l'évaluation du potentiel géothermique, notamment lorsque les indices de surfaces probants manquent.

Notre principal objectif a donc été de développer l'approche de cette "histoire thermique", grâce à différents travaux analytiques ou synthétiques, devant aboutir à la mise au point d'outils de prospection intégrables dans la méthodologie de l'exploration haute énergie.

. Un second objectif concernait l'essai de modélisation des strato-volcans andésitiques à champ géothermique potentiel associé. Ces travaux réalisés concernent principalement deux strato-volcans de l'arc Antillais à champ potentiel en cours d'exploration (Dominique et Martinique).

Cette modélisation, intégrant à la fois les caractéristiques volcanologiques s.l. des strato-volcans et les caractéristiques des champs géothermiques associés peut être le point de départ d'une méthodologie d'ensemble d'exploration et de développement de champ en contexte d'arc insulaire.

. Un troisième objectif concernait l'étude comparative de champs géothermiques situés en contexte géodynamique comparable ; comparaison portant à la fois sur les contextes géologiques et sur les méthodes d'exploration utilisées.

Une première application porte sur deux champs situés en contexte fissural de rift océanique émergé : Krafla (Islande) et Asal (Djibouti).

RESULTATS ACQUIS (NOV. 1983) ET PREVISIONS (fin 1983)

A - RECONSTITUTION DE L'HISTOIRE THERMIQUE D'UN CHAMP

Ce thème dominant a fait l'objet d'approches analytiques et synthétiques, sous forme de travaux ponctuels ou de travaux thématiques à plus long terme, qui se poursuivront en 1984.

Ces approches ont abordé trois points principaux :

- les processus hydrothermaux à partir de l'étude des dépôts hydrothermaux rencontrés en surface,
- la localisation et l'évolution de la source de chaleur, à partir de l'étude des produits magmatiques émis en surface,
- la mise en évidence de réservoirs géothermiques associés à des édifices volcaniques à activité explosive, à partir de l'étude des enclaves lithiques hydrothermalisées récoltées par le magma lors de son ascension.

A.1 - LES PROCESSUS HYDROTHERMAUX

1) Une première action concerne la définition des domaines de stabilité thermique des principales paragenèses hydrothermales rencontrées dans les forages géothermiques (argiles, zéolites, épidotes, albite, ...).

Cette approche synthétique s'appuie sur les données récoltées dans divers champs mondiaux : Nouvelle Zélande, Japon, Philippines, Islande...

En fonction de la température, un certain nombre de paragenèses types ont été définies, associant une ou plusieurs espèces symptomatiques :

- 0 à 110° : zéolites B.T., montmorillonite, kaolinite
- 110° à 165° : clinoptilolite, montmorillonite
- 165° à 230° : laumontite, illite
- 230° à 300° : illite, épidote, albite, adulaire
- 300° à 350° : biotite, actinolite, trémolite

Nous disposons donc d'une méthodologie de mise en oeuvre rapide permettant de sélectionner les zones les plus favorables (zonéographie), et d'estimer l'intensité de l'anomalie thermique lors de l'exploration de surface, et permettant également d'estimer les températures profondes lors des suivis de forage.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le département Géothermie et fait l'objet d'un rapport : "Application thermométrique de l'étude des minéralisations hydrothermales en géothermie haute énergie" (sous presse).

2) Une deuxième action concerne la caractérisation des transformations minéralogiques et géochimiques au niveau d'un champ géothermique fossile, avec l'exemple de la zone hydrothermalisée du François en Martinique (échantillonnage réalisé par D. WESTERCAMP).

Elle a donné lieu à l'étude minéralogique et géochimique des faciès primaires et des faciès plus ou moins altérés, appartenant à trois zones d'altération croissante, définies par ailleurs à partir d'une zonéographie zéolitique ; ces zones ayant été soumises à des températures estimées entre 100 et 200°C. Cette étude débouche sur une première tentative de bilan géochimique global de l'altération, intégrant les données minéralogiques (altération des phases primaires, apparition de phases secondaires) et les données géochimiques (départ ou enrichissement en certains éléments).

Les résultats de cette approche analytique ont été une amélioration de nos connaissances sur les processus physico-chimiques de l'altération hydrothermale, et l'acquisition d'un savoir-faire dans ce type d'étude qui sont directement transposables à l'étude des champs géothermiques actifs.

Ce travail fait l'objet d'un rapport : "Etude d'un champ géothermique fossile en Martinique. Bilan pétrographique, minéralogique et géochimique de l'altération" (manuscrit prêt). Ce thème d'étude doit se poursuivre de façon importante en 1984, en incluant l'aspect géochimie des fluides (avec le concours possible du PIRSEM et la réalisation d'une thèse 3ème cycle).

3) Une troisième action concerne la thermométrie optique des inclusions fluides piégées dans les minéraux hydrothermaux, avec un exemple d'application sur les phases hydrothermales (quartz et zéolites) de la Réunion et de la Martinique. Cette approche analytique est en cours, sur du matériel échantillonné lors d'études antérieures.

- un premier objectif était d'obtenir les premières indications thermométriques sur les minéralisations du champ géothermique de la Réunion en cours de développement. Actuellement, les mesures de températures disponibles (températures d'homogénéisation sur les quartz comprises entre 160 et 270°C) ne sont pas encore suffisantes pour apporter des renseignements complémentaires sur le potentiel géothermique de cette zone ;
- un deuxième objectif était de tester la fiabilité des inclusions fluides piégées dans les zéolites. Les premiers résultats obtenus (sur l'analcime en particulier) ne sont pas concluants. Cependant, si le test ne révèle positif, nous disposerions d'un outil thermométrique largement applicable en raison de l'ubiquité des zéolites.

Ce travail en cours, réalisé dans le cadre d'un stage (N. COMBREDT), fera l'objet d'un rapport (sortie fin 1983) et d'une éventuelle publication : "Application de la thermométrie des inclusions fluides sur les minéralisations hydrothermales de la Réunion et de la Martinique".

A.2 - LOCALISATION ET EVOLUTION DE LA CHAMBRE MAGMATIQUE

1) Une première action concerne l'identification des paramètres géochimiques (majeurs-traces-isotopes) marqueurs des stades de différenciation superficiels et des processus d'interaction réservoir magmatique - croûte encaissante, susceptibles d'apporter des informations sur le potentiel géothermique d'un édifice volcanique.

Cette approche synthétique et comparative utilise les données géochimiques existantes concernant les laves de la chaîne volcanique du Cameroun et les laves du Massif Central français, en raison de la disponibilité des données et des similitudes tant sur le plan géologique que sur le plan de la géochimie des sources thermominérales.

Les travaux en cours ont permis d'identifier certains éléments susceptibles d'être utilisés comme marqueurs des impacts thermique et géochimique d'un réservoir magmatique sur la croûte encaissante :

- des éléments tels que Sr, Nd, O sont utiles dans la mise en évidence des interactions réservoir-croûte (fusion crustale, assimilation, contamination par des fluides),
- les éléments traces montrent bien l'importance des processus de fractionnement superficiels dans le réservoir.

Une phase ultérieure précisera les aspects quantitatifs de cette étude : degré de contamination crustale, degré de fractionnement, durée de vie d'un réservoir superficiel,...

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une Convention de Recherches entre l'IMRG et le GIS "Synthèse des Minéraux" (Z. JOHAN). Il donnera lieu à un rapport (sortie fin 1983) : "Apport de la géochimie détaillée des laves sur l'évaluation du potentiel géothermique d'un édifice volcanique ; exemple comparatif de la chaîne volcanique du Cameroun et du Massif Central français".

2) Une deuxième action concerne l'apport des études minéralogiques fines dans l'évaluation des paramètres physico-chimiques (P.T.) régnant au niveau d'un réservoir magmatique (dans le contexte d'un champ géothermique).

Cette approche analytique en cours s'attache à préciser les paramètres température-profondeur du ou des réservoirs magmatiques à l'origine des ponces à quartz de Basse Terre en Guadeloupe ; ceci, en liaison avec les travaux d'exploration géothermique de la zone de Bouillante-Vieux Habitants. L'enjeu de ces travaux est pleinement justifié par l'absence d'indices géochimiques de surface évidents.

Une mission d'échantillonnage a été réalisée par D. WESTERCAMP. Les principales techniques d'étude mises en oeuvre sont la thermométrie optique des inclusions vitreuses et fluides (platine chauffante) ainsi que l'analyse ponctuelle des phases minérales et des inclusions (microsonde, analyseur Raman).

Ces travaux sont en cours. Ils sont réalisés dans le cadre d'une convention de recherches avec le laboratoire de R. CLOCHIATTI (Orsay). Ils se poursuivront en 1984 sous forme de travaux du laboratoire associé et de la réalisation d'une thèse 3ème cycle.

Parallèlement, le groupe VOLCANOLOGIE a apporté un soutien aux travaux d'exploration de terrain de cette zone, réalisés par le département Géothermie. Ceci va se concrétiser par la sortie d'un rapport de synthèse (sous presse) : "Exploration géologique des zones de Baillif-Vieux Habitants et Moscou - Guadeloupe".

A.3 - MISE EN EVIDENCE DU RESERVOIR GEOTHERMIQUE

Les travaux relatifs à ce troisième point se résument seulement à une mission d'échantillonnage des enclaves lithiques hydrothermalisées des édifices de la Montagne Pelée (Martinique) et de la région de Wotten-Waven (Dominique).

L'étude des transformations subies par ces enclaves hydrothermalisées a été reportée à l'année 1984, au cours de laquelle sera développé un important programme d'études des enclaves qui fera l'objet d'une thèse de Docteur-Ingénieur (AFME).

B - MODELISATION DES STRATOVOLCANS ANDESITIQUES

Cet essai de modélisation s'appuie sur la synthèse de l'ensemble des données volcanologiques disponibles, pouvant caractériser un stratovolcan andésitique et le champ géothermique qui lui est associé. La région de Wotten Waven a ainsi fait l'objet d'une étude volcanologique pilote, en liaison avec les travaux d'exploration menés par le département Géothermie.

Les travaux réalisés jusqu'à maintenant nous ont permis de préciser l'histoire volcanologique de cette région, et plus particulièrement :

- la chronologie des différents épisodes éruptifs qui ont eu lieu au sein de la zone prospectée (les derniers épisodes magmatiques reconnus ont été datés à moins de 2000 ans B.P.).
- la présence d'un dynamisme éruptif unique dans l'arc antillais, avec la mise en place de plusieurs épisodes ignimbrétiques volumineux ;
- la nature et l'évolution pétrologique des produits émis (andésites principalement, 59 à 63 % SiO_2) ;
- la mise en évidence des structures volcano-tectoniques, avec l'individualisation d'une vaste caldera complexe ou de deux calderas emboîtées consécutives aux émissions ignimbrétiques ;
- le rôle prépondérant des structures tectoniques et du champ de contrainte régional dans le contrôle du volcanisme et des structures volcano-tectoniques, ainsi que dans le contrôle des manifestations phréatiques, phréato-magmatiques, et des indices de surfaces (fumerolles, sources chaudes).

Au stade actuel de nos connaissances, il apparaît que l'anomalie géothermique de la région de Wotten Waven est clairement liée à son histoire volcanologique particulière, dont les deux principales caractéristiques sont l'émission d'ignimbrites et le rôle prédominant des structures tectoniques. Cet exemple montre l'intérêt primordial d'une reconstitution volcanologique dans l'approche géothermique d'un édifice volcanique.

Une mission de terrain de 4 mois a été réalisée (S. LEBORNE avec le soutien de D. WESTERCAMP). La synthèse des travaux de terrain et de laboratoire est faite sous forme d'un rapport (sortie fin 1983) : "Etude volcanologique de la région de Wotten Waven. Dominique. Evaluation de son potentiel géothermique".

Un deuxième essai de modélisation de strato-volcan andésitique s'applique à l'édifice de la Montagne Pelée et du champ potentiel associé de Morne Rouge, en cours de prospection. Un certain nombre de travaux ont déjà été réalisés dans le cadre du programme Risques Volcaniques du BRGM, ou des programmes PIRPSEV. Ils ont été poursuivis et ont donné lieu à la rédaction de deux articles parus ou à paraître en 1983 dans des revues internationales.

C - ETUDE COMPARATIVE DES CHAMPS GEOTHERMIQUES DE KRAFLA ET D'ASAL

Dans un premier temps, cette étude s'est attachée à caractériser et à comparer les contextes des deux rifts océaniques émergés d'Islande et d'Asal (évolution géodynamique, processus d'extension, zones d'accrétion, vitesse d'expansion, ...) ainsi que les contextes locaux des champs géothermiques d'Asal et de Krafla :

- position structurale du champ géothermique dans le rift ;
- nature de l'édifice volcanique associé ;
- pétrographie des produits éruptifs émis ;
- localisation et volume de la chambre magmatique ;
- fréquence des éruptions ;
- manifestations hydrothermales.

Dans un deuxième temps, ont été comparées les méthodes d'approche appliquées dans chacun des deux champs, en séparant :

- d'une part les travaux à finalité spécifiquement géothermique ;
- d'autre part, les travaux relatifs à la connaissance générale du rift, menés par diverses équipes scientifiques.

Dans la comparaison des contextes, il ressort le rôle respectif du magmatisme et de la tectonique dans l'individualisation des champs de Krafla et d'Asal :

- Le champ de Krafla, situé au sein d'une caldera, correspond à une intense anomalie thermique localisée, résultant d'une concentration de matériel magmatique (intrusions, dykes, chambre magmatique) à faible profondeur dans la caldera (flux élevé, activité hydrothermale intense, éruptions magmatiques fréquentes) ;
- le champ d'Asal, situé à la croisée de deux directions tectoniques majeures, correspond à une anomalie thermique à caractère plus régional résultant de la coïncidence entre gradient thermique élevé et fracturation tectonique intense.

Quant à la comparaison des méthodes d'approche, elle permet d'évaluer :

- d'une part l'adéquation des méthodes d'exploration en fonction du contexte ;
- d'autre part, la part respective des travaux à finalité géothermique et des travaux de reconnaissance générale du rift.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le département Géothermie. Il fera l'objet d'un rapport (sortie fin 1983) : "Deux champs géothermiques en contexte de rift océanique émergé, Krafla et Asal - Etude comparative des contextes géologiques et des méthodes d'exploration".

PERSPECTIVES 1984

- * Poursuite des efforts sur les thèmes Processus hydrothermaux, réservoir magmatique, réservoir géothermique.
 - application de la géochimie isotopique à l'étude des minéralisations hydrothermales ;
 - poursuite de la thermométrie optique des inclusions fluides ;
 - travaux analytiques sur les enclaves lithiques hydrothermalisées ;
 - préparation de deux thèses 3ème cycle (missions prévues).

- * Développement des études de la fracturation en contexte géothermique.
 - développement de techniques d'analyses adaptées au contexte ;
 - évaluation de l'apport des photographies satellites ;
 - préparation d'une thèse 3ème cycle (mission prévue).

- * Poursuite des études sur la région de Wotten-Waven en Dominique (en particulier sur les minéralisations hydrothermales) dans le cadre de la modélisation des strato-volcans andésitiques.

GEOCHIMIE APPLIQUEE A L'EXPLORATION HAUTE ENERGIE

C. Fouillac F. lundt

INTRODUCTION

La géochimie est maintenant couramment utilisée dans les campagnes de prospection géothermique haute-énergie. Cependant les techniques employées ne sont pas encore applicables dans tous les cas et certaines méthodes au potentiel prometteur sont très mal maîtrisées et donc sous employées. L'objectif de ce programme pluri annuel est donc double :

- Augmenter la fiabilité d'emploi des méthodes (géothermométriques classiques et s'assurer de leur applicabilité à un nombre de cas analogiques du territoire national.
- Tester les méthodes les plus récentes dont certaines sont encore sujettes à controverse et promouvoir les plus efficaces pour palier aux insuffisances des outils classiques, constatées dans certains cas.

Rappelons que l'objet de la prospection est presque toujours constitué par un système hydrothermal convectif (beaucoup plus rarement par un champ de vapeur sèche). Schématiquement, trois configurations peuvent se présenter :

a) Système affleurant ou sub affleurant :

Il est alors accompagné d'intenses manifestations de surface : Geyser et/ou sources chaudes. Les méthodes géochimiques permettent alors d'estimer la température moyenne du gisement, de cartographier les zones les plus intéressantes en cas de distribution hétérogène des températures et parfois d'estimer la quantité minimum d'énergie dégagée par le gisement. Dans ce cas les méthodes géochimiques ne posent pas de problèmes particulier d'interprétation, l'étude de ces zones est cependant fort utile car elles permettent de progresser dans la connaissance générale des champs haute énergie (signature des réservoirs et des manifestations secondaires, modèles faibles de champs)

b) Système "sous couverture semi-perméable" :

Les formations écran sont soit des aquifères superficiels, soit des colmatages intenses. Des tensions notables de l'existence du réservoir arrivent quant même en surface (sources chaudes ou tièdes). Les méthodes géothermométriques commencent alors à poser des problèmes d'application,

les techniques de délinéation des zones les plus favorables sont alors très délicates car les mouvements de fluides géothermaux peuvent être affectés par les circulations météorique ou subsuperficielle. Les manifestations de surface se réduisent d'ailleurs parfois à des venues gazeuses et la prospection à partir de ces indices bien que très prometteuses est à l'heure actuelle difficilement maîtrisée.

C'est sur ce type de configurations que porte l'essentiel de nos efforts actuels.

c) Le système profondément enfoui sous couverture quasi-étendue.

La géochimie ne peut alors servir qu'à la détection de l'anomalie, parfois à sa cartographie, soit par :

- géochimie de sols,
- géochimie des gaz dans les sols,

Ces méthodes connaissent actuellement un développement rapide mais sont dépourvues de cadre thermique.

RESULTATS ACQUIS EN 1983

1 - ETUDE DE CAS

- Etude de zones ou champs géothermiques actifs :

a) zone de Wotten Waven Boilinglake (Dominique)

Cette étude menée en collaboration avec le département GTH consiste en l'interprétation de données acquises au cours d'une mission effectuée en 1982. Un très bref résumé est fourni en annexe 1. Le travail final est à paraître.

- Etude du fluide géothermique à Bouillante : annexe 2.

- Etude du réservoir géothermique du Momotombo au Nicaragua :

Des échantillons provenant de 5 forages différents ont été prélevés au cours d'une mission IMRG en janvier 1983. Les analyses chimiques (oxydes et gaz isotopiques ont été réalisées). Des différences de composition à l'intérieur du réservoir mettent en évidence la complexité des constitutions hydrodynamiques haute énergie. Texte final dans le rapport annuel 83.

- Réflexions générales sur l'applicabilité des géothermomètres chimiques classiques en milieu carbo gazeux :

Publication chemical géothermometry in CO₂ - riche thermal waters.
C. FOUILLAC Géothermics vol 12 2/3 p 149-160

2 - NOUVELLES METHODES DE PROSPECTION

- Méthodologie d'analyse des gaz in situ :

Il apparaît très important dans une prospection de pouvoir sélectionner en temps quasi réel les échantillons gazeux les plus représentatifs des conditions profondes, on doit donc disposer d'appareillages portables robustes et si possibles simples d'emploi permettant l'analyse des gaz.

Deux options ont été investiguées :

- Analyse par chromatographie gazeuse de terrain.
- Acquisition du CPV et de son enregistreur.
Les premiers tests se dérouleront à partir de la mi-novembre 83. Cet appareil déjà employé en volcanologie permet d'analyser CO_2 , CO , H_2S , N_2 , O_2 , Ar , H_2 , CH_4 et concerne donc un large spectre de composés.
- Dosage de CO_2 , H_2S , NH_3 par voie électro chimique. Les gaz sont piégés dans des barboteurs solution Alcaline pour HCO_2 et H_2S (précipitation au sulfure métallique pour H_2S) HCl concentré pour NH_3 . On procède ensuite à une titration électrochimique pour CO_2 et H_2S , avec les électrodes indicatrices appropriées. Le dosage a lieu soit directement sur la solution alcaline (H_2S , CO_2) soit après reprise du sulfure métallique par l'acide et piégeage secondaire dans la cellule e titration. Cette variante pour H_2S permettrait de mieux se préserver des possibles oxydations.
 NH_3 est dosé par mesure directe avec une électrode semi perméable à gaz ORION.
Ces techniques électrochimiques sont très précises mais ne permettent l'analyse que de 3 composés.
Acquisition du matériel et premier test d'étalonnage.

- Thermométrie par oxygène 18 des sulfates :

(Voir annexe 3)

- Etudes de phénomènes d'oxydo-réduction

(Voir annexe 4)

ETUDE GEOCHIMIQUE DES MANIFESTATIONS THERMALES
DE L'ILE DE LA DOMINIQUE

C. FOUILLAC - F. IUNDT

Au cours de prospection géothermique dans l'Ile de la Dominique (petites Antilles), une étude géochimique a été effectuée sur de nombreuses manifestations thermales. Trois grandes régions de l'île ont été étudiées : Soufrière au Sud Ouest, Wotten Waven et région du Boiling lake à l'Est de Roseau (capitale). Chaque zone possède de nombreuses manifestations thermales : sulfatares, fumeroles, geysers, "mud pools", sources thermales. Les mesures de terrain, t° , pH, débit, résistivité ainsi que les analyses chimiques et isotopiques permettent de caractériser différents types chimiques d'eaux géothermales, classiquement associées aux champs géothermiques haute énergie :

chlorurées sodiques de pH neutre, sulfatées acides, bicarbonatées sulfatées sodiques, sulfurées sodiques. Les compositions chimiques des échantillons les plus représentatifs de chacun de ces types d'eau sont données dans le tableau 1.

D'un point thermique on obtient des estimations concordantes avec les géothermomètres chimiques pour les eaux chlorurées sodiques de la région de Wotten Waven - Boiling lake. Dans cette zone l'ensemble des données met en évidence l'existence d'un aquifère chloruré sodique à 230°C . Les sources sulfatées acides bicarbonatées ou sulfurées, s'interprètent comme des eaux météoriques locales, réchauffées et modifiées par des fuites de vapeur d'eau et/ou de gaz (H_2S , CO_2) en provenance de réservoir chloruré profond.

D'un point de vue isotopique l'ensemble des effets géothermaux habituellement rencontrés : échange avec l'encaissant à haute température, évaporation, évolution de fluides résiduels, se retrouve sur les échantillons de l'île comme le résume la figure ci-jointe.

TABLEAU 1

N°	Temp. in °C	Outflow approx. in l/mn	Conduct. at T° spring in $\mu S\ cm^{-1}$	pH at T° spring	Na *	K *	Ca *	Mg *	Cl *	HCO ₃ *	SO ₄ *	NO ₃ *
DM 15	96.6	4.0	20.60	7.97	68.70	5.17	1.32	0.02	75.1	1.26	0.50	0.2
DM 19	20.5	2.0	0.694	3.22	0.67	0.041	1.01	0.28	0.16	0.00	2.92	0.1
DM 21	92.0	4.0	2.12	6.62	3.14	0.217	1.72	0.80	1.47	5.56	1.46	0.1
DM 31	49.3	5.0	1.24	5.95	2.42	0.269	1.50	1.13	1.01	6.91	0.19	0.9

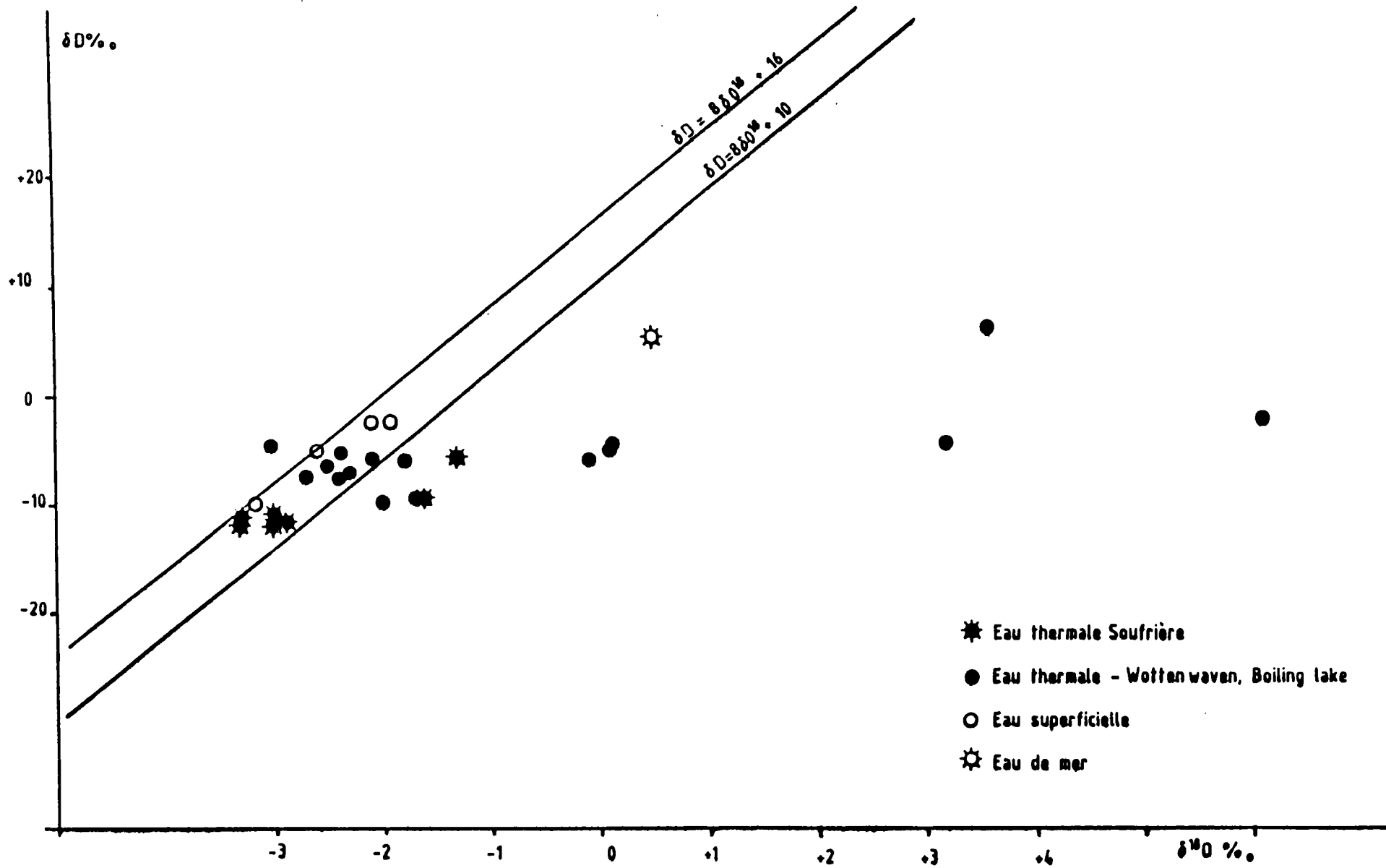
* 10^{-3} mole/litre

N°	SiO ₂ **	Li **	NH ₄ **	Sr **	F **	B **	Fe **	Mn **	Rb **	Al *	Co ***	As ***
DM 15	459	51.9	0.6	0.9	3.5	88	0.1	0.07	1.2		16.8	112.1
DM 19	43	0.1	0.5	0.1	0.5	1	3.6	0.73	0.1	0.46	0.01	0.13
DM 21	304	0.7	0.7	0.3	0.5	18	0.1	1.93	0.1	-	0.36	0.12
DM 31	323	0.9	0.5	0.3	3.5	7	5.0	0.71	0.1	-	0.68	0.21

* 10^{-3} mole/litre

** 10^{-5} mole/litre

*** 10^{-7} mole/litre



ETUDE GEOCHIMIQUE DES FLUIDES DU FORAGE
GEOOTHERMIQUE DE BOUILLANTE (GUADELOUPE)
F. IUNDT

Une étude géochimique détaillée des fluides du forage géothermique (BO₂) a été réalisée au cours de la campagne d'essais de production de vapeur.

L'utilisation d'un mini séparateur "Webre cyclone" en tête de puits a permis l'échantillonnage d'eau, de gaz et de condensats de vapeur à des pressions et des températures variables (de 160° à 100°). Des mesures in situ ont été réalisées : température, pression, pH, conductivité, humidité de vapeur. Les éléments non conservatifs : sulfures, bicarbonates ont été dosés au moment même du prélèvement. Les analyses chimiques des éléments majeurs et traces ainsi que les isotopes ont été effectuées après divers conditionnements spécifiques.

Une telle méthodologie de prélèvements, d'analyses et de mesures a permis une meilleure connaissance des propriétés physico-chimiques du fluide profond. On a pu ainsi étudier l'évolution de la composition chimique et isotopique de l'eau du réservoir au cours de son ébullition pendant la remontée vers la surface. Le diagramme (fig.1) représente l'évolution des teneurs en chlorure et en deutérium du fluide géothermal résiduel et de la vapeur condensée à partir du réservoir initial. On peut noter suivant les degrés de vaporisation effective, directement liés à la température, une composition chimique résiduelle qui s'écarte notablement de la composition initiale mais très proche de celle de l'eau de mer. Ce point ne doit pas être perdu de vue en prospection géothermique où, parfois, seules les fractions de liquide résiduel sont accessibles à l'échantillonnage. De tels mécanismes peuvent amener à des conclusions erronées quant à l'origine des fluides. A l'issue de cette étude un modèle hydrogéochimique du système géothermique de Bouillante sera proposé. Seront également mis en évidence le comportement de certains éléments volatils (NH₃, H₂S, As, B) au cours de la vaporisation.

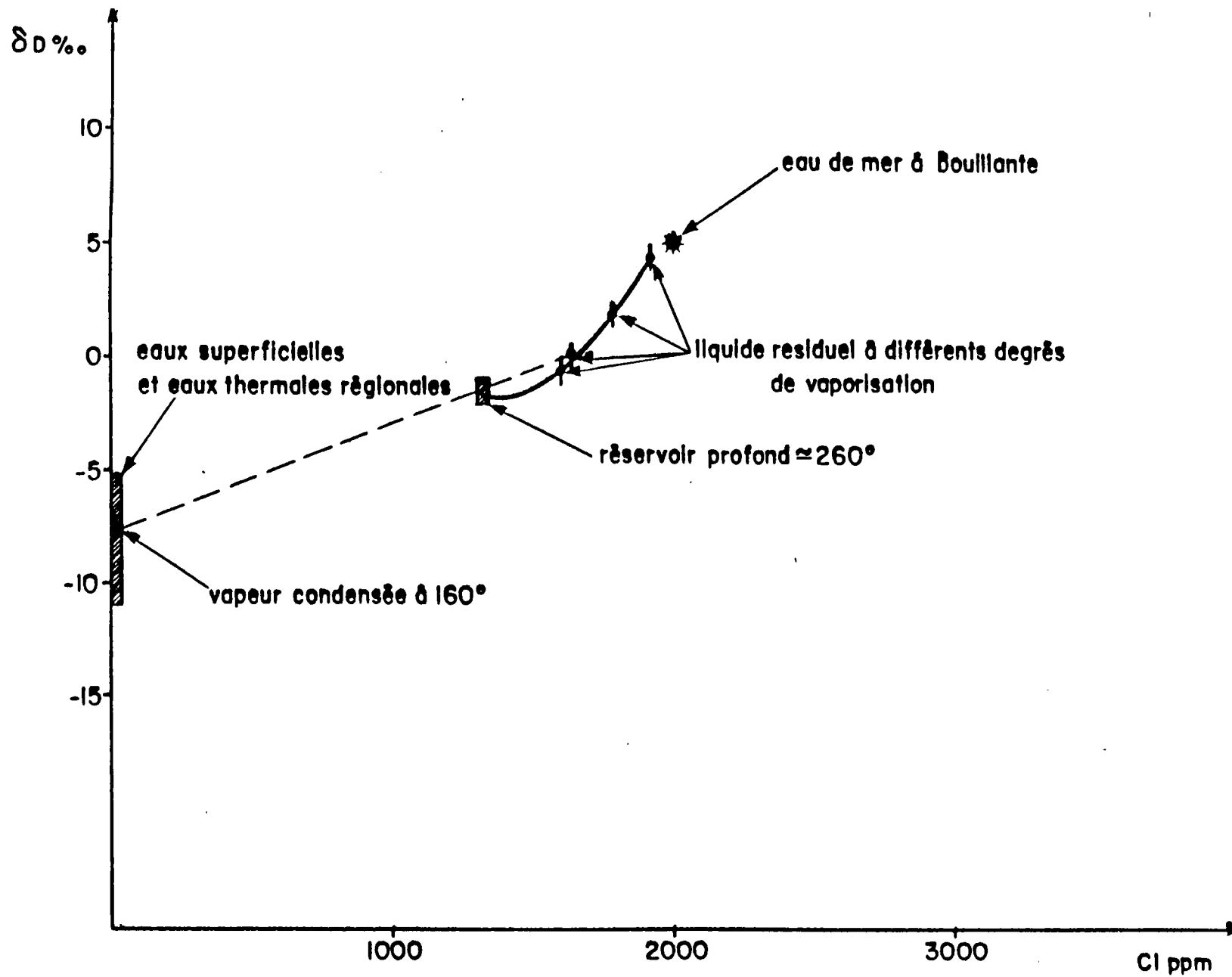


Figure 1

GEOOTHERMOMETRIE ISOTOPIQUE DE L'OXYGENE 18
SULFATE-EAU

Résultats préliminaires

A.M. FOUILLAC - C. FOUILLAC - F. TUNDT

A - INTRODUCTION

Estimer les températures profondes des eaux géothermales constitue un des buts majeurs de la prospection géochimique. Les géothermomètres chimiques, simple d'emploi, ne suffisent pas toujours pour atteindre un résultat certain, surtout quand des phénomènes variés perturbent la chimie des fluides dans les circuits de remontée. Les géothermomètres chimiques trouvent ici le revers de leurs qualités :

- La composition d'équilibre est très rapidement atteinte en profondeur, mais elle peut être modifiée par des réactions secondaires non équilibrées.

Les géothermomètres isotopiques fonctionnent suivant une "gamme de temps" assez différente. Les équilibres profonds peuvent être atteints très lentement, mais ensuite, certains d'entre eux subissent un "effet de trempe" remarquable dans les circuits de remontée. Des modifications secondaires peuvent bien sûr avoir lieu, mais elles proviennent des eaux très différentes de celles affectant les géothermométries chimiques. Par comparaison, on peut beaucoup plus aisément lever les indéterminations.

Depuis quinze ans environ, de nombreux géothermomètres isotopiques ont été proposés et testés, une "sélection naturelle" a dégagée les qualités de la thermométrie par l'oxygène 18 des sulfates.

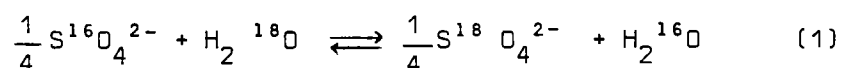
Ce programme a donc pour but :

- d'achever la mise au point analytique initiée en 82 dans un programme commun des départements MGA et GTH du BRGM
- de préciser les conditions d'emplois par mesures sur forages (Haute et basse enthalpie) et test sur des zones de haute enthalpie prouvée où la thermométrie classique est particulièrement convaincante
- d'utiliser systématiquement cette technique pour conclure dans des cas ambigus du territoire national (Lorraine, Massif Central, Martinique)

B - RESULTATS ACQUIS EN 1983

1/ Synthèses des études antérieures

Le thermomètre isotopique sulfate-eau est basé sur la répartition des isotopes de l'oxygène entre les ions sulfates (SO_4^{2-}) dissous et les molécules d'eau (H_2O). La répartition d'équilibre selon



est classiquement fonction de la température.

Les premiers travaux fait pour la détermination du fractionnement isotopique sont les calculs théoriques de UREY (1947). Des déterminations expérimentales ont été menées ensuite afin de préciser ce travail théorique, respectivement sur l'anhydrite, l'ion bisulfate et la barytine : LLOYD (1968), MIZUTANI et RAFTER (1969), KUSAKABE et ROBINSON (1975).

L'application de ce géothermomètre a été vérifiée avec succès sur des forages de nombreux champs géothermiques : Wairakei N.Z. Otaka Ohnuma, Japon; Larderello, Italie ; Yellowstone Park, Long Valley, Raft River, E.U.

La formule communément employée est celle de MIZUTANI et RAFTER :

$$1000 \text{Ln}\alpha = 2.88 (10^6 \text{T}^{-2}) - 4.1 \quad (2)$$

T température absolue en °K

où

$$\alpha = \frac{{}^{18}\text{O} / {}^{16}\text{O} (\text{SO}_4^{=})}{{}^{18}\text{O} / {}^{16}\text{O} (\text{H}_2\text{O})} \sim \frac{1000 + \delta {}^{18}\text{O} (\text{SO}_4)}{1000 + \delta {}^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})}$$

en utilisant la définition classique pour les $\delta^{18}\text{O}$.

Les "paramètres cinétiques" d'atteinte de l'équilibre pour la réaction (1) sont les suivants :

$$\log. t_{1/2} = (2.54 \cdot 10^3 / T) + b$$

avec $t_{1/2}$ temps de demi-réaction
T température absolue
b constante fonction du pH

aux valeurs de pH habituellement rencontrées dans les champs géothermiques, on obtient :

$t_{1/2} = 2$ ans	à 300°C
$t_{1/2} = 18$ ans	à 200°C
$t_{1/2} = 1500$ ans	à 100°C

aux températures géothermales et pour les temps de résidence des solutions couramment admis, l'équilibre est très vraisemblablement atteint, par contre, aux températures plus basses des circuits de remontées, les durées très grandes nécessaires à une nouvelle distribution d'équilibre assurent une bonne conservation de l'information primaire.

2/ Mise au point analytique

La technique de mesure de l'oxygène 18 de l'eau étant acquise en routine depuis longtemps au laboratoire, le travail de mise au point a porté sur la mesure de l'oxygène des sulfates.

2a/ Principe de la méthode

Cette technique a fait l'objet de nombreux articles de mise au point, plus ou moins détaillés, qui révèlent leur complexité. LLOYD, 1968, MC KENZIE et TRUSDELL, 1977, NEHRING, BOWEN et TRUESDELL, 1977, CLAYPOOL, HOLSER, KAPLAN, SAKAI, ZAK, 1980, MIZUTANI, 1971, RAFTER et MIZUTANI, 1967, RAFTER, 1967, LONGINELLI et CORTECCI, 1970.

- Les ions sulfates doivent être précipités sous forme de sulfate de baryum pur
- Le sulfate de baryum est porté à 1100°C en présence de carbone afin d'obtenir du CO₂. Suivant la réaction : $\text{BaSO}_4 + 2 \text{C} \rightarrow \text{BaS} + \text{CO}_2$. Le CO qui se forme également doit être reconverti sous forme de CO₂.



- Le CO₂ obtenu est analysé au spectromètre de masse

2b/ Préparation des échantillons

Sur le terrain les espèces réduites du soufre (HS⁻ Sn²⁻) sont bloquées au zinc ou au cadmium puis séparées par filtration afin que des produits d'oxydation tardives n'interfèrent pas avec les sulfates initiaux.

Au laboratoire, pour procéder à l'extraction, il est nécessaire que les sulfates soient sous forme de BaSO₄ pur afin que les rendements et la reproductibilité soient bons.

La précipitation gravimétrique des sulfates doit être faite de façon à limiter la concentration en ions pour éviter les coprécipitations d'éléments par adsorption.

La concentration en ions sulfates doit cependant être suffisante pour obtenir un bon rendement de cette précipitation.

L'échantillon prélevé est filtré puis amené à pH 2. Un ajout de résine cationique est fait afin d'éliminer les cations de la solution. Suivant les concentrations déterminées auparavant pour les anions, l'échantillon sera ensuite plus ou moins dilué, afin de diminuer la concentration en anions, tout en respectant une concentration suffisante en sulfates.

La solution est ensuite portée à ébullition puis un ajout d'une solution de chlorure de baryum bouillante est fait.

Après décantation, le précipité est filtré et rincé abondamment. Enfin, il est séché à l'étuve.

2e/ Extraction de l'oxygène des sulfates

Le schéma de principe de la ligne d'extraction est reporté Fig. 1. 10 mg de l'échantillon de sulfate de baryum sont broyés dans un mortier avec 10 mg de carbone spectrométrique. Ce mélange est ensuite placé dans un creuset de platine, lui-même suspendu dans une enceinte en quartz A.

L'ensemble est dégazé pendant une nuit à 100°C (quatre échantillons sont dégazés à la fois).

L'échantillon est ensuite chauffé à l'aide d'un four haute fréquence à une température de 1050°C. Du CO₂ et du CO se dégagent, le CO₂ est piégé à l'azote liquide dans le piège en U. Le CO est ionisé dans l'enceinte B afin de se recomposer en CO₂ suivant la réaction $2CO \rightarrow CO_2 + C$. L'ionisation est obtenue en appliquant une différence de potentiel de l'ordre de 2000 volts entre 2 électrodes de platine. La réduction et l'ionisation se poursuivent jusqu'à l'obtention d'une pression résiduelle de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2}$ TORR. Le rendement est calculé après mesure de la pression dans le manomètre.

L'échantillon est ensuite piégé dans le tube à échantillon puis analysé au spectromètre de masse.

- Les creusets sont nettoyés chaque fois à l'acide fluorhydrique à 75 %, puis rincés et passés à la flamme

- Les enceintes A et B sont nettoyés à l'acide fluorhydrique diluée puis rincées et séchées à l'étuve toutes les 3 analyses

- Les électrodes sont nettoyées à la flamme toutes les 3 analyses

- Un standard interne et un sulfate provenant d'une eau de mer sont régulièrement analysés

3/ Conditions d'application

L'utilisation de ce géothermomètre est optimum dans le cadre d'une étude chimique et isotopique complète. En effet, dans certains cas des phénomènes naturels peuvent perturber ce thermomètre et en limiter l'utilisation. Une bonne connaissance du terrain et de la géochimie des eaux permet de les mettre en évidence.

La présence de niveau évaporitique sur le trajet des eaux géothermales peu conduire à une redissolution des sulfates sédimentaires. Le $\delta^{18}O$ des sulfates dissous en sera perturbé.

Des réductions d'oxydo-réductions liées au cycle du soufre dans la nature (réduction bactérienne des sulfates, oxydation des sulfures) peuvent également nuire à la précision de la méthode. L'étude isotopique du soufre est alors d'un grand apport pour la mise en évidence de ces évènements. Enfin, les eaux thermales au cours de leur remontée peuvent subir des phénomènes de dilution et/ou ébullitions. Dans ce cas, ces effets peuvent être calculés et des températures raisonnables estimées.

4/ Premiers résultats obtenus

Plusieurs études sont maintenant en cours. A titre d'exemple, nous pouvons citer les premiers résultats obtenus sur des prélèvements de sources chaudes ou de puits de forage.

	$T^{\circ} (SO_4^{2-}-H_2O)$	T° mesurée en forage	T° estimées thermomètres chimiques
	-----	-----	-----
Aulnay (forage)	72°C	71°C	
La Dominique (Wotten Waven (source))	197°C		210-230
Croizat Massif Central	162°C		150-180

Des résultats plus complets seront fournis dans le rapport annuel 1983 et dans les publications spécialisées.

BIBLIOGRAPHIE

- UREY, H.C. 1947 - The thermodynamic properties of isotopic substances.
J. Chem. Soc. (1) : 562-81.
- LLOYD, 1968 - Oxygen isotope behaviour in the sulfate-water system. *Jour. of geophysics res. vol. 73, n° 18.*
- MIZUTANI et RAFTER, 1969 - Oxygen isotopic composition of sulphates - 3 - oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system. *N.Z.J. Sci. 12, 54-59.*
- KUSAKABE et ROBINSON, 1975 - Oxygen isotopic fractionation factor between barite and H₂O at hydrothermal temperature. *Abst. papers of 1975. Annual Meeting of Japan. Geochem. Soc. p. 89.*
- MC KENZIE W.F. and TRUSDELL A.H., 1977 - Geothermal reservoir temperature estimated from the oxygen isotopic compositions of dissolved sulfate and water from hot springs and shallow drillholes. *Geothermics 5 : 51-61.*
- NEHRING N.L., BOWEN P.A. and TRUESDELL A.H., 1977 - Techniques for the conversion to carbon dioxide of oxygen from dissolved sulfate in thermal waters. *Geothermics 5 : 63-66.*
- CLAYPOOL G.E., HOLSER W.T., KAPLAN I.R., SAKAI H., ZAK I., 1980 - The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chem. Geology 28 : 199-260*
- MIZUTANI Y., 1971 - An improvement in the carbon reduction method for the oxygen isotopic analysis of sulphates. *Geochem. J. 5 : 69-77.*
- RAFTER T.A., 1967 - A method for the extraction of oxygen and its quantitative conversion to carbon dioxide for isotope radiation measurements. *New Zealand Jour. of Science 10, p. 493-510*

RAFTER T.A., MIZUTANI Y., 1967 - Preliminary results on oxygen isotopic variation in sulphates and the relationship to their environment and to their $\delta^{34}\text{S}$ values. *N.Z. Jour. Sci.* 10 : p. 816-840

LONGINELLI A. et CORTECCI G., 1970 - Composizione isotopica dell'ossigeno nei solfati. Tecniche di misura. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.* 26 : 733-743.

PHENOMENES D'OXYDO-REDUCTION ET COMPORTEMENT DES ELEMENTS TRACES ASSOCIES

A. Criaud*- C. Fouillac

INTRODUCTION

Les éléments traces (Fe, Mn et autres métaux de transition ; As, Sb) enregistrent beaucoup plus les variations des paramètres physiques t, pH, Eh, des fluides que les éléments majeurs. En conséquence, ils peuvent être utilisés de manière inverse pour détecter et décoder certaines évolutions des-dits paramètres. Le potentiel d'oxydo-réduction des fluides géothermaux a été peu pris en considération jusqu'à présent.

Une bonne compréhension de ce paramètre est importante, il caractérise en effet indirectement le degré de transformation subi par le fluide à partir du réservoir profond : les solutions des champs géothermiques correspondent à des conditions très réduites, les eaux de surface sont oxydantes, on perçoit aisément que le devenir des solutions "en route" vers la surface sera de perdre plus ou moins ce caractère réducteur. L'importance des transformations subies éclairera alors sur la nature des circuits de remontée. Dans un groupe de sources données, issues d'un même réservoir, on peut choisir de façon plus certaine celles qui sont reliées directement au réservoir profond. Ceci renseigne donc sur les zones de circulations préférentielles.

RESULTATS ACQUIS EN 1983

Signification de la mesure du potentiel d'oxydo-réduction dans les eaux carbogazeuses

Il est acquis depuis de nombreuses années que la mesure de ce paramètre n'a aucune signification dans les eaux superficielles. En revanche, une étude détaillée de plusieurs groupes de sources minérales du Massif Central français nous a permis de montrer que le potentiel mesuré à l'électrode de platine correspondait à un équilibre entre la solution et deux phases minérales du fer : Fe^{III} hydroxyde - Fe^{II} sidérite.

La figure 1 illustre l'excellente corrélation entre les valeurs calculées théoriquement et les valeurs mesurées. Par conséquent on dispose d'un moyen rapide et aisé de caractériser sur le terrain l'état d'oxydation des sources thermales. En milieu carbogazeux, lors d'une prospection portant sur un très grand nombre de sources, il sera alors commode de sélectionner les échantillons les plus représentatifs des conditions profondes à l'aide de ce simple paramètre.

* A. CRIAUD : Dépt. MGA BRGM

Comportement des éléments traces associés

De nombreux éléments traces ont été analysés dans les sources du Massif Central français. Parmi tous les éléments étudiés, les éléments de transition Fe, Mn, Ni, Co sont indubitablement solubilisés dans les étapes ultimes des circuits hydrothermaux. Inversement, les éléments tels que As, Sb sont très enrichis dans les réservoirs profonds et ont tendance à diminuer, plus les eaux sont modifiées.

Une première illustration est fournie par les sources de la vallée de Chaudesfour fig. 2a à 2d, dont l'évolution chimique est très caractéristique de celle des eaux carbogazeuses. Ces indexes qualitatifs "d'altérations" des solutions profondes ont pu être utilisés dans le Cézallier pour distinguer 2 groupes de sources, de composition en élément majeur identique, mais très différentes par leurs teneurs en arsenic et antimoine.

Début de l'étude systématique d'arsenic et antimoine dans les eaux géothermales

Ce comportement remarquable de As et Sb, teneurs maximales dans les sources les moins perturbées, s'accorde bien avec les quelques résultats publiés partant en général sur des forages. On ne pouvait cependant pas exclure totalement qu'il s'agisse d'effets dus à des minéralogies particulières. Nous avons donc entrepris une étude systématique de As, Sb dans des fluides haute énergie d'origine variée. Les échantillons étudiés en 1983 proviennent :

- Nicaragua : champ géothermique du Momotombo
forages, volcanisme calco-alcalin
- Guadeloupe : forage de Bouillante
- Tibet : zones de haute énergie
milieu de socle granitique sous faible
couverture sédimentaire

Tous les échantillons présentent des teneurs élevées en As (plusieurs mg/l) et antimoine (plusieurs centaines de microgrammes/l) (tableau 1).

	Sb µg/l	As mg/l
16(14)	249	4,6
12(22)	151	3,4
5(4)	372	6,4
9(4)	276	4,4
8(13)	111	2,9

Tableau 1 : Nicaragua - forage du Momotombo

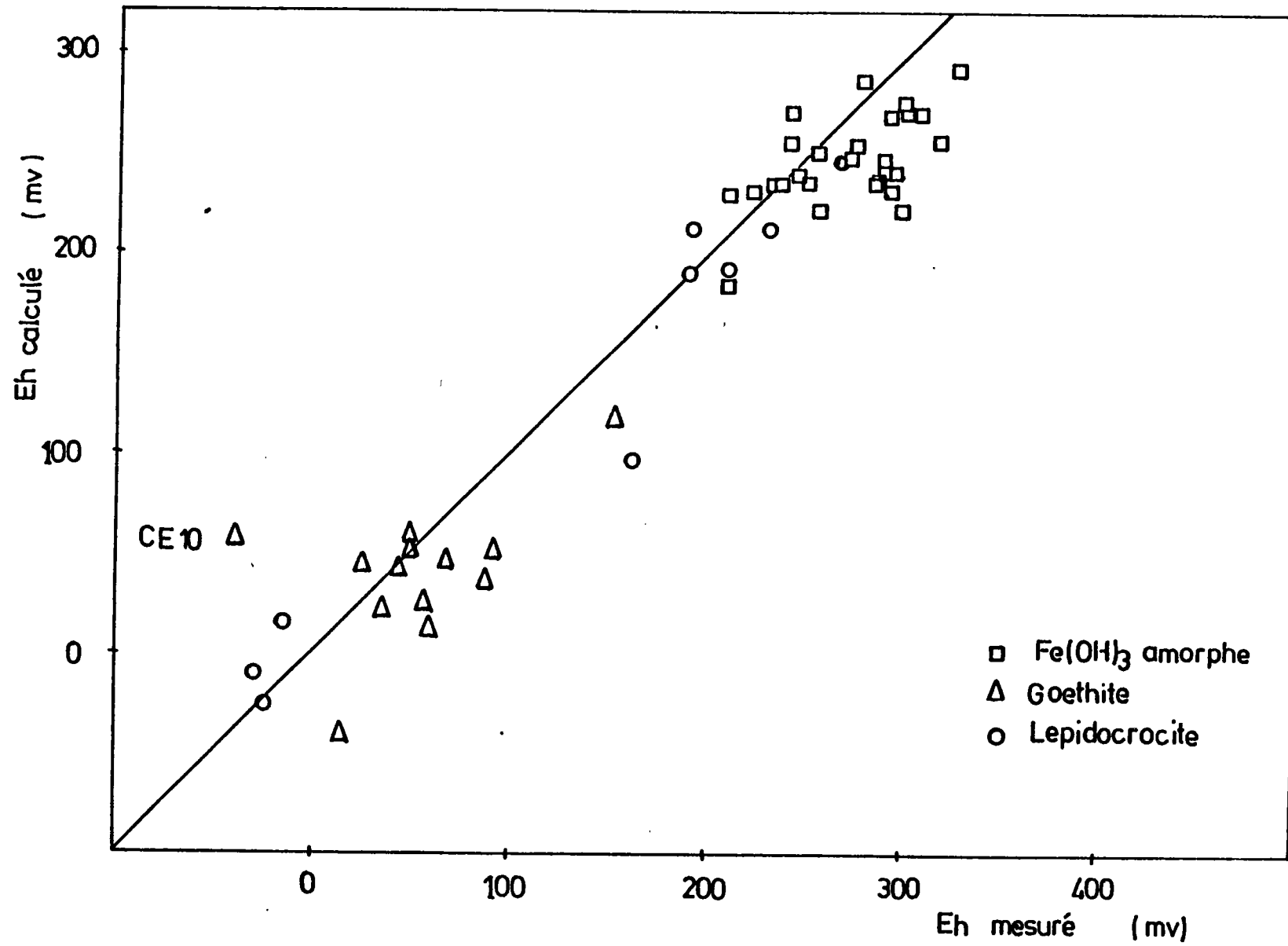
Il semble donc probable que ce phénomène soit général. On aurait ainsi une autre méthode qualitative (haute teneur en As et Sb) de choisir les échantillons les plus directement reliés aux réservoirs profonds.

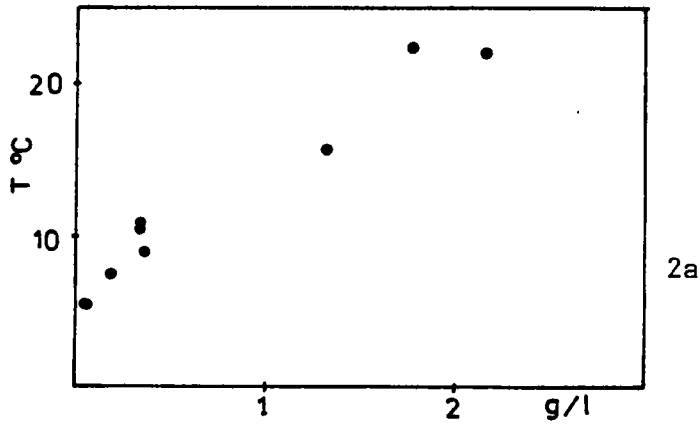
Ces études poursuivies en 1984 fourniront des moyens pour détecter à l'intérieur d'un "prospect" haute enthalpie, les zones de fracturation les plus intenses. Elles correspondent aux remontées rapides des fluides profonds.

Bibliographie

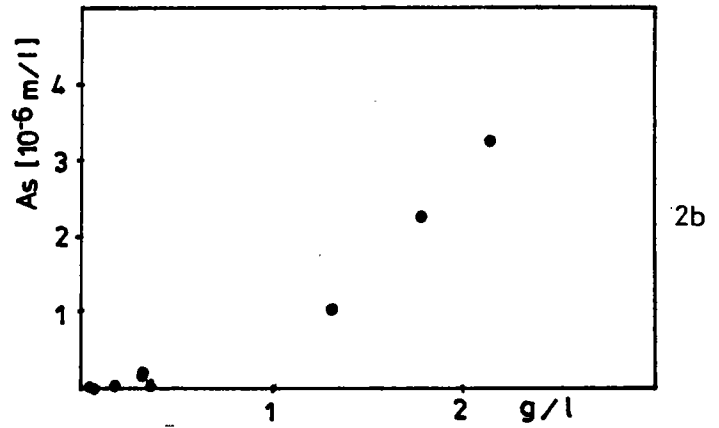
A. CRIAUD - Thèse 3ème cycle, Phénomènes d'oxydo-réduction et métaux en traces dans les eaux carbogazeuses du Massif Central, Juin 1983.

Figure 5



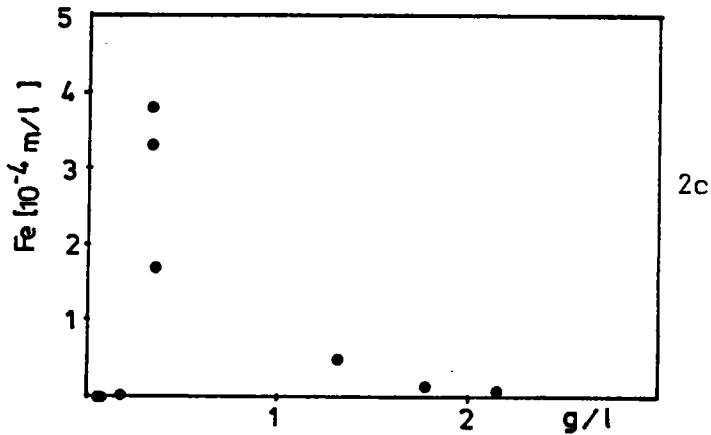


Minéralisation totale



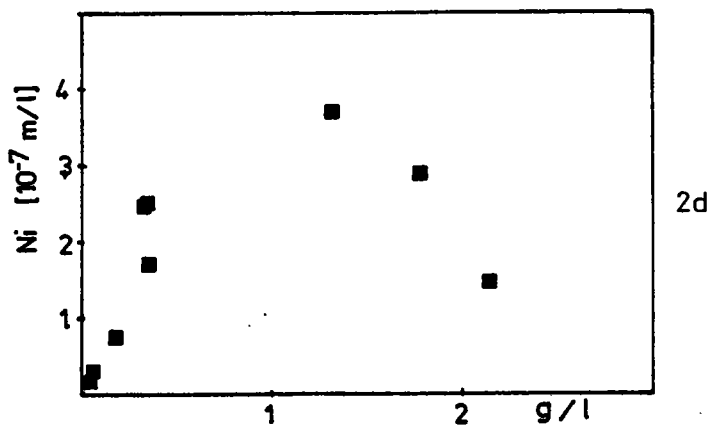
2b

Minéralisation totale



2c

Minéralisation totale



2d

Minéralisation totale

FIGURE 2 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE (a), DE L'ARSENIC (b), DU FER (c) ET DU NICKEL (d) EN FONCTION DU MELANGE, DANS UNE SERIE DE SOURCES DE LA VALLEE DE CHAUDEFOR, MASSIF DU SANCY (= SANCY)

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.

B.P. 6009

45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.

27, Rue Louis Vicat

75015 PARIS

- CIBLES GEOTHERMIQUES NOUVELLES -

- Document provisoire -

C O N F I D E N T I E L

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

CIBLES GEOTHERMIQUES NOUVELLES

C. Fouillac

OBJECTIF :

Il s'agit d'évaluer, en territoire métropolitain, le potentiel géothermique de cibles, qui ne sont pas pour l'instant comptabilisées parmi les ressources. Il peut s'agir d'aquifères peu connus du bassin sédimentaire déjà exploité par ailleurs, et dont les caractéristiques température, perméabilité sont prometteuses. Nous avons également envisagé des zones de socle, parfois sous couverture sédimentaire importante, pourvues de gradients géothermiques anormaux. Dans ce cas la productivité des "réservoirs" escomptés étant fournie par des fissurations ou fracturations très importantes, ou par des aquifères en toits de socle.

MOYENS :

Une équipe constituée de géochimistes, géologues, thermiciens géophysiciens de l'I.M.R.G. a entrepris la réalisation de ce programme. En 1983, les efforts ont été concentrés sur trois projets :

- Aquifères sédimentaires (le Lusitanien du bassin parisien)
- Régions de socle fracturé (systèmes thermaux du Sud Lorraine
systèmes carbo gazeux du Cézaillier)
- Cible locale (Anomalie de Haguenau)

La première étude vise une ressource de basse enthalpie classique, les deux suivantes des ressources de moyenne ou haute enthalpie (140 à 200°C).

Les analyses nécessaires à ces études sont obtenues dans les services analytiques du BRGM (chimie des solutions, pétrographie sédimentaire, pétrophysique) ; les données thermiques en zone sédimentaire sont acquises traitées et interprétées par l'équipe thermique de l'IMRG.

CHRONOGRAMMES :

Les résultats déjà acquis en 83 et les programmes futurs sont détaillés dans chacune des fiches jointes. on ne trouve ici qu'un chronogramme général.

	1983	1984	1985
Lusitanien	diagraphies études faciologiques pétrophysiques : Définition de l'aquifère	Essai sur puits et proposition d'expériences de démonstration.	Contrôle et certification des règles d'évaluation mis au point en 1984.
Socles fracturés	Etudes géochimiques régionales, géothermométrie hydrogéologie, étude chimique détaillée des fluides.	Contrôle géophysique géologique et forage d'exploration des cibles.	Evaluation du potentiel géothermique probable de ces zones.
Haguenau	Définition de l'intérêt de la cible et de l'implantation du forage.	Recherche de financement et forage	Caractérisation de la ressource effectivement contrôlée.
Projets		Démarrage d'opération Néocomien Mt Dore et autres sites Massif Central Pyrénées	

CIBLES GEOTHERMIQUES NOUVELLES

OXFORDIEN (Lusitanien)

J.P. Cautru - B. Bouniol

A la suite des travaux de B. HOUSSE et Ph. MAGET* et B. BOUNIOL et Ph. MAGET** l'étude de l'Oxfordien supérieur (Lusitanien des auteurs anciens) et de ses niveaux réservoirs s'est déplacée vers le Centre et le Nord Est du bassin de Paris où se réunissent température intéressante, faciès a priori favorables et utilisateurs potentiels. Elle est conduite à différentes échelles depuis des investigations de fin détail sur les carottes du sondage de Nantouillet dont les résultats seront étendus aux structures de Crouy-sur-Ourcq et Coulomnes, jusqu'à des extrapolations régionales et l'élaboration de cartes paléogéographiques dont la finalité sera de localiser les zones les plus prometteuses.

ETUDES DE DETAIL

Elles font l'objet de la thèse de 3ème cycle de B. BOUNIOL.

L'étude a porté, tout d'abord, sur la reconnaissance de la zone la plus favorable du réservoir oxfordien supérieur : il s'agit du Nord Est de Paris qui répond aux trois exigences principales :

- présence de matériaux d'étude,
- caractéristiques de réservoirs favorables,
- potentiel du Dogger bien entamé dans cette zone.

A - ACQUISITION DE DONNEES

. Recherche de matériel disponible (carottes) : 3 structures présentent des outils de travail : carottes ou échantillons de l'Oxfordien supérieur disponibles, diagraphies différées, proximité de forages géothermiques pour extrapolation.

- Nantouillet forée par Pétrorep, échantillons au B.R.G.M.
- Crouy forée par Gaz de France échantillons chez G.D.F.
- Coulomnes forée par Pétrorep échantillons chez Elf.

* B. HOUSSE et Ph. MAGET, 1976 - Potentiel géothermique du Bassin Parisien - B.R.G.M. - Elf Aquitaine.

** B. BOUNIOL, Ph. MAGET, 1983 - Ressources géothermiques au Lusitanien dans le Bassin parisien - Rapport BRGM 83 SGN 045 GTH.

. Des contacts ont été pris avec les différents possesseurs de documents et de carottes :

Les échantillons présents au B.R.G.M. ont été mis à disposition ;

les entrevues avec les responsables G.D.F. ont permis d'accéder aux carottes de Crouy ;

les contacts avec Elf pour la récupération de carottes sont en cours et vont aboutir d'ici à la fin de l'année (accord de principe acquis, modalité d'acquisition en discussion).

. Parallèlement les ouvrages bibliographiques, rapports de fin de sondage, fiche de carotte, résultats diagraphiques ont été réunis et étudiés.

B - ANALYSE DES STRUCTURES

. Etude de Nantouillet : après récupération des échantillons et rapports de fin de sondage.

- description lithologique du sondage, découpage lithostratigraphique de l'étage, description et évaluation des faciès favorables pour échantillonnage secondaire (70 échantillons) ;

- l'échantillonnage secondaire a subi des mesures pétrophysiques, c'est-à-dire courbes de porosité (macro - micro) au mercure (pores ouverts - connectés) et perméabilité à l'eau ; ceci a permis de définir des niveaux réservoirs (toit, mur, épaisseur, caractéristiques) et l'origine de ces niveaux (relation faciès-caractères pétrophysiques en cours), comparaison avec les résultats diagraphiques du forage.

- corrélation avec les résultats des sondages voisins de la structure, évolution géographique des niveaux et faciès rencontrés, élaboration d'un log-type de la structure.

. Etude de Crouy :

- après récupération des rapports G.D.F. et carottes, deux puits sélectionnés pour mesures complémentaires notamment pour harmonisation des mesures de Nantouillet et de Crouy.

- corrélation avec les puits de la structure.

C - RESULTATS ACQUIS

L'étude de la structure de Nantouillet a permis d'élaborer un log-type délimitant les principales zones réservoirs, leur faciès et leurs caractéristiques.

- réservoir supérieur R1 de type Grainstone oolithique bien mis en évidence en diagraphie (faible résistivité, faible vitesse de son) ce réservoir possède une porosité à majorité macroporeuse (>7%) donnant des perméabilités de 100-150 mD en laboratoire (mesures pessimistes), mal récupéré lors du carottage à Nantouillet. Des tests ont été effectués à ce niveau par les pétroliers qui donnent des résultats favorables. Son épaisseur varie entre 15 et 30 m.

- réservoir intermédiaire R2 de type Grainstone oolithique reconnu par plusieurs petits niveaux poreux et perméables entrecoupés de zones plus compactes. Il est caractérisé en diagraphie par des petits pics correspondant aux zones poreuses. Sa porosité totale est supérieure à 15% et sa perméabilité supérieure à 150 mD.

- réservoir inférieur R3. A la base de la zone oolithique. D'une épaisseur variant entre 20 et 40 m, il est caractérisé par un Grainstone oolithique bien individualisé en diagraphie. Il constitue la zone favorable la plus étendue et donne des valeurs de porosité supérieures à 15% pour des perméabilités supérieures à 150 mD.

Ces trois zones ont été corrélées sur les puits de la structure de Nantouillet. On a ainsi pu déterminer leurs variations spatiales. Des analogies sont visibles avec les puits de la structure de Crouy.

Les comparaisons avec les puits GTH de l'Est Parisien laissent envisager des niveaux réservoirs équivalents en diagraphie.

L'évolution vers le Sud-Sud Est montre cependant une évolution de faciès. L'étude du champ de Coulomnes permettra d'évaluer cette variation.

D- PLANNING, ETUDE ENVISAGEE

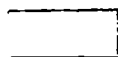
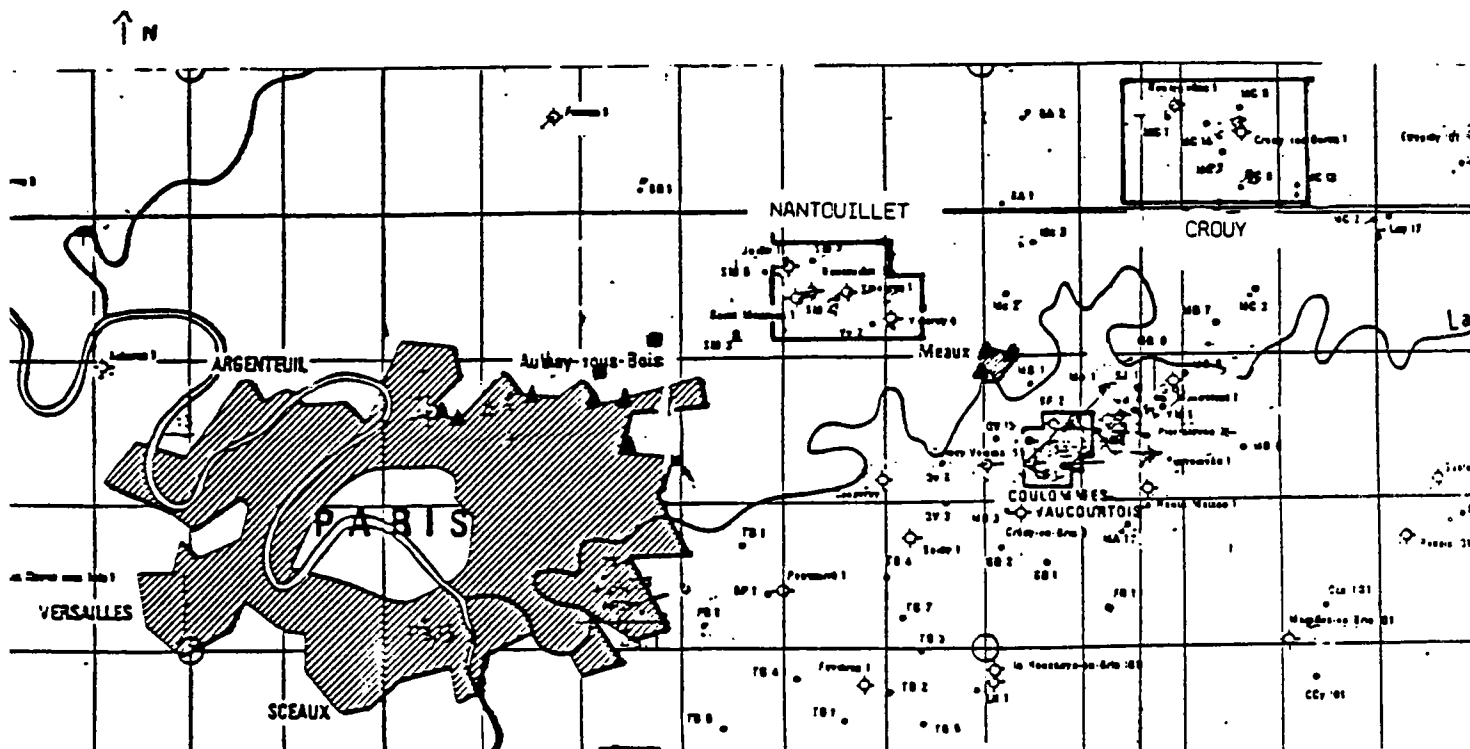
Les résultats déjà acquis doivent être complétés.

La description des niveaux réservoirs de Nantouillet doit être précisée. Notamment l'origine des niveaux favorables et les phénomènes responsables de ces caractères pétrophysiques. Cette description est en cours à l'aide d'observation au microscope après imprégnation de résine colorée.

Le repérage fait à Nantouillet de faciès favorables doit être complété à l'aide de mesures pétrophysiques complémentaires.

Les niveaux rencontrés à Nantouillet doivent être extrapolés à Crouy et à Coulomnes et analysés :

- mesures pétrophysiques : pour la connaissance des caractéristiques de ce niveau,
- analyses sédimentologiques : pour la compréhension de la genèse de ces niveaux.



Structures à l'étude



Forages GTH réalisés dans l'Est Parisien



Forages GTH en cours de réalisation dans l'Est Parisien



Forages pétroliers

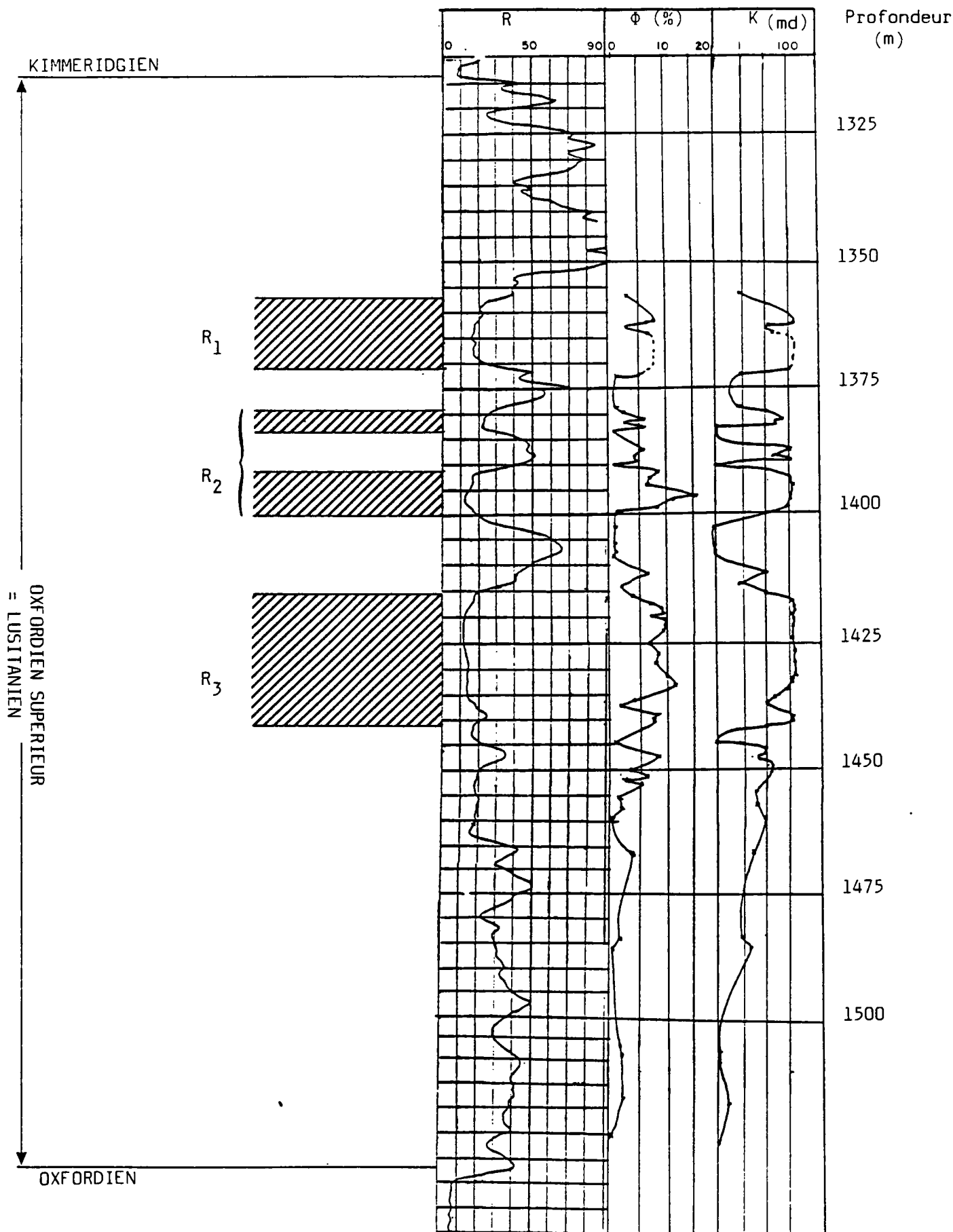


Core-drills

5 Km

PLAN DE SITUATION DE L'ETUDE

LOG DE NANTOUILLET I



Mesures de terrain :
diagraphie de
résistivité

Mesures de laboratoire :
macroporosité perméabilité
(--- extrapolation en l'absence
de carotte)

ETUDE GENERALE

Elle en est au stade de la compilation de documents : recherche bibliographique, réunion des coupes de forages tant pétroliers que géothermiques, élaboration d'une méthode de travail.

La recherche bibliographique automatique a fait sortir environ 1500 titres parmi lesquels un premier tri a montré quelques 250 références pertinentes. L'exploitation est en cours. Nous avons extrait pour illustration un bloc diagramme établi par HUMBERT et PAULIN* exactement dans l'esprit de ce que nous voudrions réaliser.

La réunion des coupes de forages pétroliers et géothermiques, de même que l'établissement de coupes d'après la notice des cartes géologiques (24 coupes et forages archivés à ce jour) permet d'entrer dans le détail de la série calcaire de l'Oxfordien et de pressentir où pourraient être les niveaux producteurs d'eau chaude.

Dans un tel contexte récifal à polypiers, et périrécifal à oolithes et gravelles il faudra s'attacher à délimiter les zones de barrières, d'avant et arrière récif où, a priori, les espoirs sont les plus grands. Une reconstitution paléogéographique et sa représentation sur cartes et coupes devra donc être mise au point.

* HUMBERT L., PAULIN Ch, 1977 - Oxfordien carbonaté récifal de l'Est du Bassin de Paris. Symposium sur le Jurassique Ouest Européen, 7-8 Mai 1977.

Hubert et Paulin 1977

RELATIONS STRUCTURALES ENTRE LES DIFFERENTES UNITES SEDIMENTAIRES

Comprises entre le toit du Bathonien ou du Callovien calcaire et le mur du Kimméridgien argileux.
(unité K3 sur le profil de terrain, Planché 09)

Echelle 1/500 000

LEGENDE

Calcaire crinozoïcien (lithographie au crayon)
S44 Vase carbonaté

Argile de grès
S44 Vase argileux ou sable siliceux (surtout)

Calcaire à grands échantillons ou lambeaux de lit
S44 Sable carbonaté ou vase

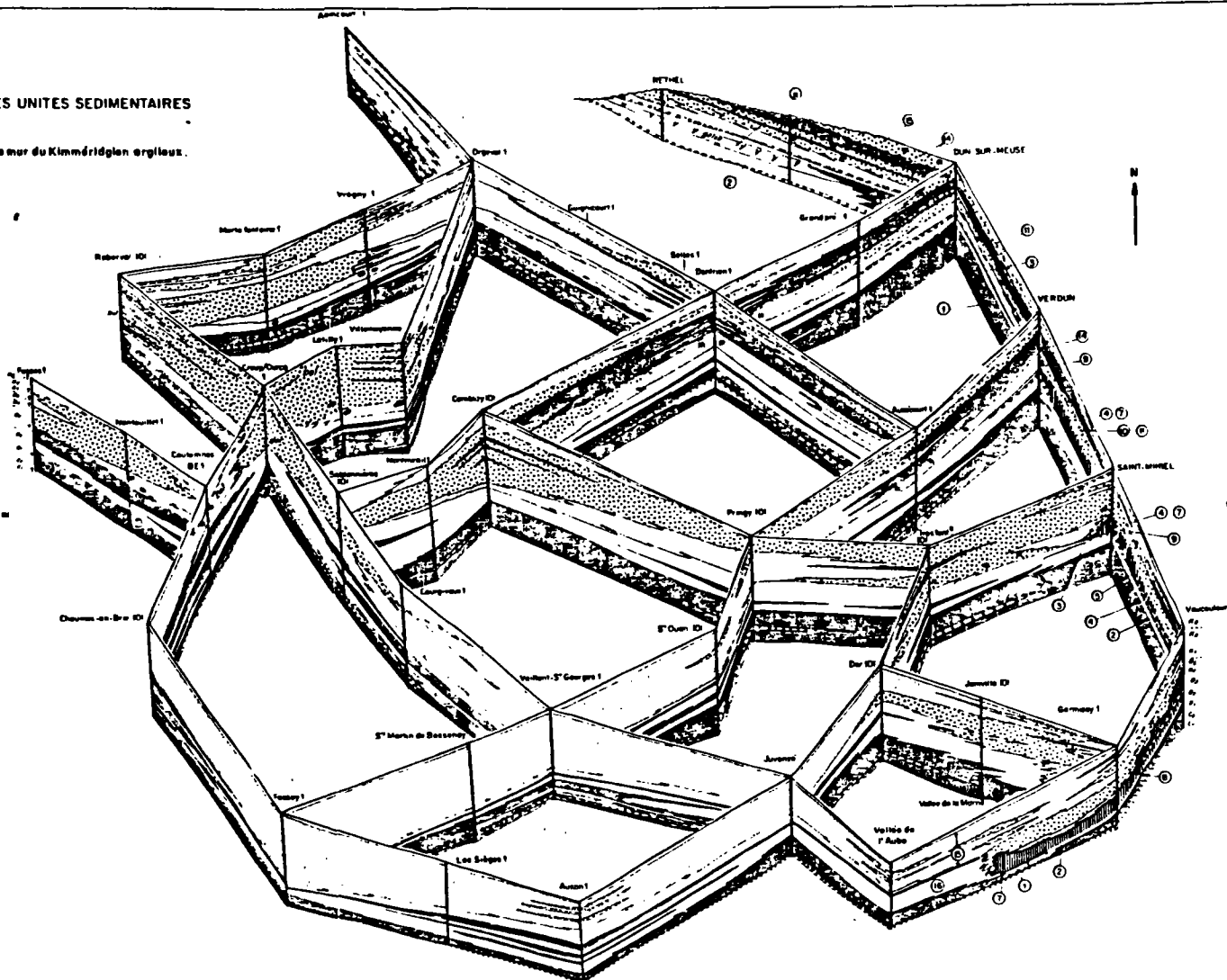
— Bâton
Del. Bâton

① Unité sédimentaire identifiée sur le terrain
C1, C2... K1 Coupure - temps (microforme - stratifiée)

--- Niveau ferrugineux

ECHELLE VERTICALE 1 Cm [100m]

PLAN DE POSITION



CIBLE LOCALE

CAS PARTICULIER DE L'ANOMALIE DE HAGUENAU

(granites fissurés sous couverture sédimentaire)

OBJECTIFS :

La région Nord-Haguenau - Soultz-sous-Forêts est le siège d'une intense anomalie thermique (figure 1) où le gradient des températures atteint en surface plus de 10,5°/100 m. L'anomalie est située dans une partie de l'Alsace du nord où la température, dans les formations sédimentaires, suit une loi du type $\theta(^{\circ}\text{C}) = 4 + 0,067 P$ (P = profondeur exprimée en mètres) soit un "gradient régional" supérieur à 6°C/100 m environ deux fois plus fort que le gradient connu dans les autres bassins sédimentaires français.

RESULTATS ACQUIS :

1 - REPRISE DES TRAVAUX ANTERIEURS*

De l'analyse de l'ensemble des diverses publications et rapports disponibles ressortent les éléments fondamentaux suivants :

- Le sommet de l'anomalie thermique a été contrôlé par des mesures de température, au cours de tests sur 3 forages (1 en 1949, 2 en 1950) espacés de 500 m (figure 1) environ qui ont indiqué tous les trois 112°C à 860 m. (Les tests DST faits étant réputés fournir des mesures de température plutôt par défaut). Le gradient maximum moyen sur 860 m serait donc plus fort qu'en surface et serait de l'ordre de 12 °C/100 m.
- Une autre mesure de température réalisée en un point où le gradient superficiel n'est plus que 8,5°C/100 m montre qu'en profondeur sur 1150 m d'épaisseur, le gradient moyen s'établit autour de 10°/100 m ; Ce qui renforce la crédibilité de l'hypothèse de la présence d'une source de chaleur anormale encore plus profonde.
- Compte tenu des données de tectonique reposant sur un certain nombre de travaux géophysiques (sismique, gravimétrie, magnétométrie) confirmées par deux forages, le socle est granitique (carottes disponibles du sondage de Soultz-sous-Forêts, n° 4616). Il présente de grandes failles parallèles à l'axe du graben Alsacien. Localement à hauteur de l'anomalie thermique la chute du socle vers l'axe du graben est brutalement interrompue par une forte remontée locale qui dessine un horst. Vers le sommet du horst, le toit du Buntsandstein remonte jusqu'à 150 m par rapport au niveau qu'il atteint à l'emplacement d'un forage plus à l'ouest mais proche du sommet qui a touché le socle à 1380 m. On peut donc estimer que le sommet véritable

* Etude fondée pour l'essentiel sur l'analyse des documents suivants :

- Synthèse géothermique du fossé Rhénan supérieur - MAGET et al., 1979,
- Résistivités électriques dans le fossé Rhénan en relation avec la géothermie - Franc de FERRIERE, 1978
- Etude méthodologique - la géophysique au service de la géothermie - CACHEUX, 1975

du horst granitique (très proche de l'axe d'anomalie thermique) culminerait vers 1200 mètres.

Un deuxième sondage au socle, plus à l'ouest touchant le granite à 1561 m paraît significatif de la profondeur maximale atteinte par le socle à l'ouest du horst, au pied de ce dernier.

2 - INTERPRETATION

L'image tectonique du socle, le long du profil ouest-est repérable sur la figure 1, paraît proche de ce que l'on a reporté figure 2. Un profil sismique réalisé récemment plus au sud par la Société Total confirme bien l'image générale de cette coupe.

A ce stade trois hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la genèse de l'anomalie thermique (de l'ordre de 40°) admissible au toit du socle d'après la figure 2.

- a) La première schématisée sur la figure 2, suppose une remontée actuelle d'eaux thermales qui circulent à la faveur du champ de fractures qui délimitent le flanc ouest du horst.
- b) La seconde hypothèse demanderait d'admettre une circulation d'eaux dans les niveaux proches du toit du socle. (Rappelons que le forage à 1150 m n'a pas rencontré la source de l'anomalie). Ces eaux descendant des Vosges pourraient s'infiltrer au plus bas vers 1600 m où elles atteignent quelques 110°C et remonteraient brutalement le long des failles bordelières du horst. Le problème est que l'anomalie thermique au toit du Buntsandstein serait, d'après la figure 2, à une température anormalement forte de 40°C ce qui demande une remontée très rapide de l'ordre de 600 m alors que le socle ne paraît remonter que que quelques 400 m au plus (très localement). Par ailleurs on a observé une température de 120°C à 1150 m dans le Buntsandstein à proximité immédiate du toit du horst mais un peu vers l'ouest de l'anomalie thermique connue en surface.
- c) Une troisième hypothèse pourrait faire appel à un bloc granitique anormalement chaud vis-à-vis de sa profondeur actuelle pour une raison actuellement indéterminée (système hydrothermal profond ? origine volcanique profonde locale ? radiodivinité ?)

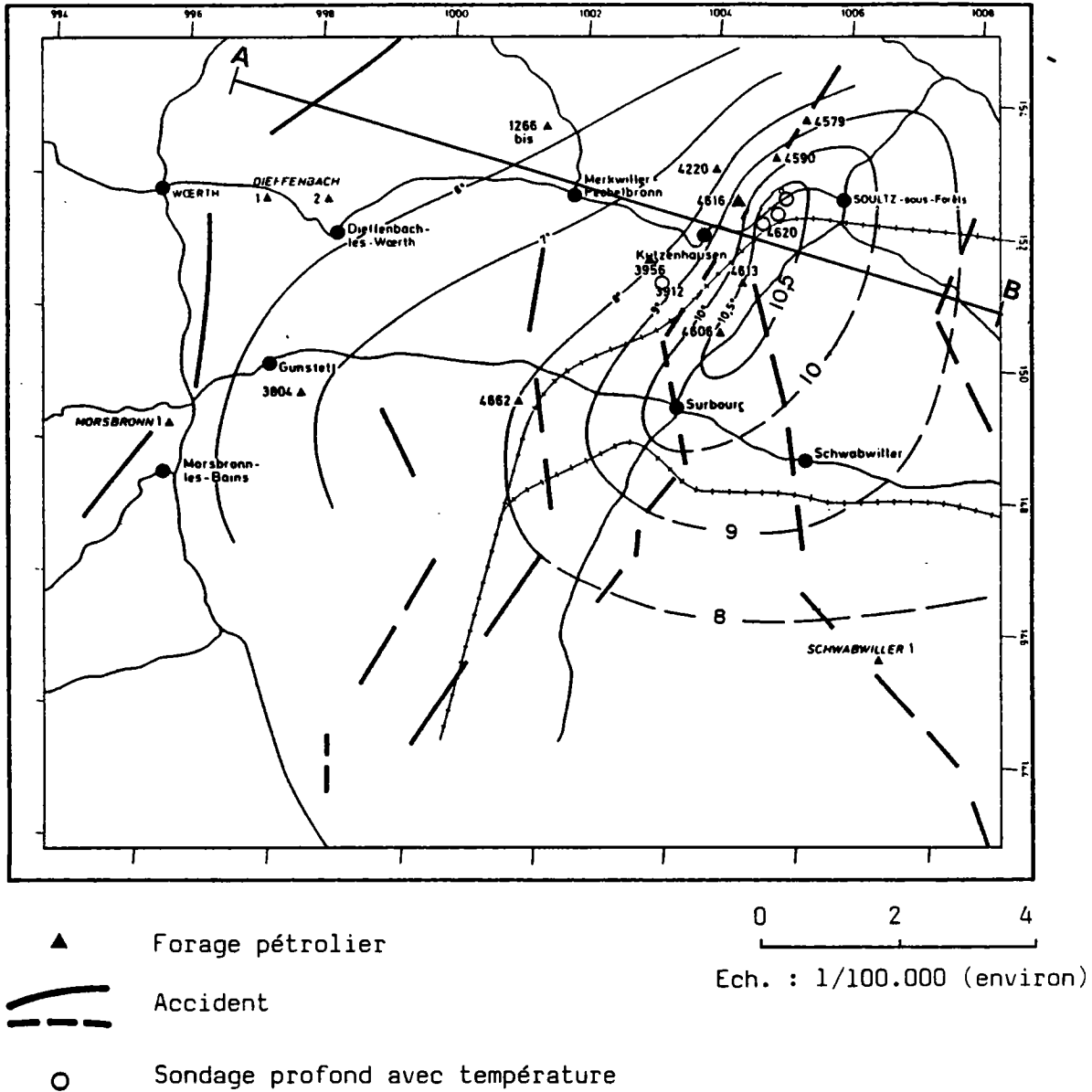
CONCLUSIONS ACTUELLES :

En conclusion, le site Soultz-sous-Forêts - Haguenau paraît bien avoir une très forte probabilité de présenter les caractéristiques suivantes :

- Granite "chaud", fracturé sous recouvrement sédimentaire épais entraînant l'accès à une température pouvant dépasser 120° à 1200 m et peut-être 200°C vers 2000 mètres.

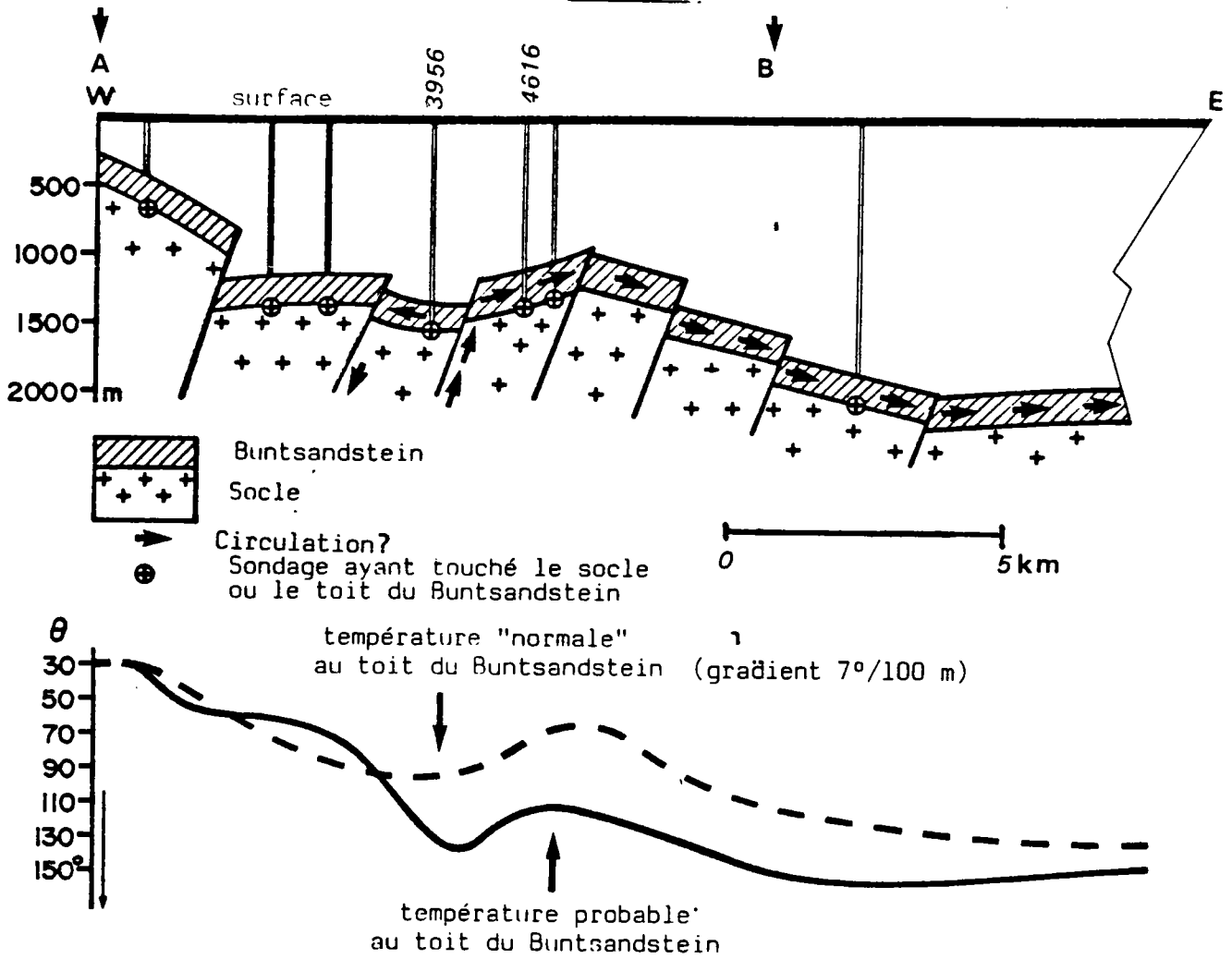
CARTE DE GRADIENT GEOTHERMIQUE EN DEGRES C/100 METRES

FIGURE I



HYPOTHESE DE CIRCULATIONS HYDRO-THERMALES
 MORPHOLOGIE DU TOIT DU SOCLE GRANITIQUE LE LONG DU PROFIL

FIGURE 2



(Formations permienes considérées comme négligeables à l'échelle de ce croquis)

Ces températures très élevées vers 2000 mètres pourraient être espérées dans deux hypothèses :

- Présence d'une faille, siège de circulations hydro-thermales suggérant l'ouverture au moins partielle du système et son caractère de "réservoir thermique" intra-faille.
- Présence locale d'un granite anormalement chaud vis-à-vis de sa profondeur actuelle pour des raisons à déterminer.

Quoiqu'il en soit, on a la quasi certitude de pouvoir trouver vers 1200 m dans le Buntsandstein un réservoir potentiel à température d'au moins 120°C de productivité à déterminer selon la perméabilité des formations. Les travaux sur forages pétroliers montrent qu'en Alsace la perméabilité est très liée au degré de fissuration. On peut donc espérer ici des conditions tout à fait favorables en raison de la tectonique particulière du système.

TRAVAUX EN COURS

Nous avons entrepris le montage d'une exploration complémentaire par écoute sismique passive sur les failles ouest bordières du horst, (qui se déroulera en décembre 1983) dans l'espoir d'observer des zones de mini-foyers sismiques qui pourraient être indicatrices des fractures les plus instables. Une étude du comportement du bruit micro-sismique sera réalisée par la même occasion.

On espère en retirer des informations utiles pour l'implantation précise d'un forage de reconnaissance qui représenterait l'outil d'exploration finale permettant de tirer au clair les origines de cette cible et d'évaluer son intérêt énergétique potentiel.

MILIEU FISSURE DE SOCLE
ETUDE GEOCHIMIQUE DES SOURCES THERMALES
SUD-LORRAINE ET SOURCES AVOISINANTES
IMPLICATION GEOTHERMIQUE

C. Fouillac D. Garcia

INTRODUCTION

Cette étude reprend l'analyse des émergences thermales, assez nombreuses, du massif vosgien et de sa bordure. une recherche systématique de sources non encore analysées s'ajoute au complément analytique de certaines zones déjà bien étudiées comme Plombières.

Etude de base : - analyses chimiques de majeurs, traces, isotopes et gaz

Objectif : - atteindre une compréhension géochimique et hydrodynamique du système comprenant :

- . une estimation des températures profondes
- . la présence d'un ou plusieurs réservoirs
- . une influence du socle et du trias sur le chimisme des eaux
- . une insertion des émergences dans leur contexte géologique, tectonique et pétrographique.

A - RESULTATS ACQUIS EN 1983

I - SYNTHESE ET EVALUATION DES ETUDES ANTERIEURES

1.1. - Rappel : Localisation des émergences : (cf fig 1)

La zone étudiée comprend :

- la partie méridionale des vosges : Plombières-les-bains, Bains-les-bains.
- la bordure sud : Luxeuil-les-bains
- la bordure ouest : Bourbonne-les-bains

Un effort particulier est fourni pour Luxeuil et quelques sources éparses peu étudiées :

- Luxeuil : horst à recouvrement triasique sur substratum cristallin (alt. 300 m)
- Font Vecoux (Remiremont) : émergeant d'éboulis sur le granite des Crêtes (alt. 569 m)
- Font. Gruy : dans des éboulis du plateau de Gruy-les-Surance à couverture triasique (alt. 470 m)
- Rehaingoutte (Saulxures/Moselotte) : dans des épandages du granite des Crêtes (alt. 600 m)
- Bussang : sources issues de schistes fracturés primaires (alt. 731 m)

Ces émergences sont souvent associées à des accidents majeurs.

1.2. - Résumé des études précédentes

Les sources bibliographiques qui ont servi de base à notre étude de synthèse, sont données dans l'annexe 1.

Ces ouvrages assez nombreux font état des résultats d'analyses géochimiques sur la zone, avec une tentative de détermination de l'origine des éléments du fluide, des mélanges d'eaux et de la température du fluide en profondeur à l'aide de la géothermométrie.

Bien que les températures se situent dans une marge intéressante, une ambiguïté fondamentale résulte du simple examen des températures profondes estimées pour les stations majeures de la zone :

LOCALISATION	Na/k	Na-K-Ca	Na/li	SiO ₂	18 ₀ (So ₄ 2)
PLOMBIERES	130	180	195	140	195
BAINS LES BAINS	195	160	215	150	-
BOURBONNE	149	170	215	110	-

Notons que Luxeuil n'a jamais été étudié en détail, de même que les sources isolées citées plus haut. Les discordances entre les estimations de température peuvent résulter de deux causes principales :

- non atteinte d'un équilibre chimique en profondeur,
- perturbations des compositions chimiques du fluide lors de la remontée vers la surface, ces perturbations sont diversement enregistrées par les géothermomètres ; elles résultent de mélange, de changement de phase, de dissolution/précipitation.

Dans le cas des Vosges, la première explication peut être écartée :

- . les temps de résidence des fluides en profondeur sont très longs (absence de tritium, faible activité ^{14}C sur les quelques mesures effectuées). les conditions cinétiques nécessaires à l'atteinte d'un équilibre chimique sont ainsi satisfaites.
- . Grande similitude de ces eaux avec les systèmes pyrénéens, islandais pour lesquels l'équilibre global a été très bien établi.

Au contraire, les modifications secondaires sont très probables dans cette région car des unités géologiques différentes (socle, couverture sédimentaire) recoupent les circuits supposés des fluides, de plus des indices de mélange important existent pour un grand nombre de stations. A ce titre, les études pourtant très détaillées de la station de Plombières, n'expliquent pas le caractère partiellement oxydé des fluides : absence de soufre réduit, potentiels red-ox faiblement négatifs. Remarquons également que l'étude sur Bains-les-bains souffre d'un mauvais échantillonnage, les quatre sources analysées étant strictement identiques (t° et chimie) alors que les émergences restantes présentent des variations de composition chimique et de température.

Nous avons donc entrepris un complément d'étude basé sur un échantillonnage plus complet, une prise en compte plus soignée des phénomènes d'oxydo-réduction avec mesures in situ des paramètres essentiels. Des compléments d'analyses isotopiques dont la répartition est très inégale sur la zone (un seul point correctement étudié : Plombières) et des analyses de gaz dissous figurent également dans l'étude en cours.

2 - TRAVAUX D'ANALYSES COMPLEMENTAIRES EFFECTUES EN 1983

2.1. - Campagne de prélèvements -juin 1983 :

Méthodologie utilisée : série de prélèvements systématiques pour les émergences des stations thermales et les sources éparées, en vue d'une analyse chimique complète.

Luxeuil, à la base de cette étude, a fait l'objet d'un échantillonnage du plus grand nombre de sources possible.

a) Analyse in situ : appareils de mesures

- sonde de température (1/10e degré)
- KNICK pour le pH (1/100e) avec étalonnage et la mesure du potentiel d'oxydo-réduction (Eh)
- résistivimètre
- sonde à oxygène dissous : l'utilisation de cet appareil n'a pas été sans problème puisqu'il n'a pas été possible, dans certains cas, d'effectuer la mesure (Bénédictins, Sondage 9, Vauquelin, S.1, S.14, Mont l'Etang). La prochaine mission, prévue fin Novembre, reprendra les mesures non-réalisées.
- échantillonnage en cations, anions, traces, isotopes et gaz.

b) Analyse en laboratoire

- Eléments majeurs :

Na, K, Ca, Mg
HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, SiO₂

- Eléments traces :

Li, B, Fe, Mn, Sr, F
Fe, Mn, Al
As, Rb, Cs

Résultats en notre possession

- Demandes d'analyses d'isotopes : deutérium-oxygène 18 de l'eau :
résultats prévus fin Novembre

- Analyse de gaz (11/83) : résultats prévus acquis (CO₂, Ar, N₂, CH₄, He, O₂)

- Les isotopes ³⁴S et ¹⁸O des sulfates sont en attente à l'analyse ; l'échantillonnage ayant été fait sur le terrain (résultats 1er trimestre 84)

les tableaux de résultats des analyses complètes
figureront au rapport annuel de l'IMRG (Mars 1984)

3 - INTERPRETATIONS PRELIMINAIRES :

Les résultats acquis sur les échantillons prélevés en juin appellent les commentaires suivants :

- L'ambiguïté sur les températures profondes s'étend à toutes les stations de la zone, généralisant l'impression de phénomènes perturbateurs intenses.

- Ces évènements secondaires peuvent être attribués, à Luxeuil et Bourbonne, à l'influence de terrains triasiques comportant des minéraux à haute vitesse de dissolution. En ce qui concerne Plombières, les fluides sont effectivement partiellement oxydés. L'oxygène dissous a pu être détecté dans les échantillons les plus chauds (t = 74°C) qui étaient jusqu'à présent considérés comme non mélangés et représentatifs du réservoir profond. On devrait alors admettre la contribution d'une composante superficielle oxygénée même dans les sources les plus chaudes.

- Les sources isolées et en particulier Fontaine de Gruey correspondent bien à des circulations profondes et chaudes. Ceci conforte le diagnostic des circulations dans ce massif.

B - POURSUITE DE L'ETUDE (fin 83 et 84)

Début décembre, une deuxième mission aura lieu, elle sera centrée sur Bains-les-bains mais on procédera aussi à un contrôle des mesures d'oxygène dissous, ce paramètre apparaissant tout-à-fait primordial en particulier pour l'étude de Plombières. A ce jour les teneurs dans les eaux les plus chaudes ont été obtenues soit par mesure directe des gaz dissous par chromatographie en phase gazeuse, soit par extrapolation de mesures électro-chimiques réalisées sur les échantillons moins chauds. Ces deux estimations sont bien concordantes.

Un échantillonnage destiné à établir l'équation isotopique $\delta D = f(S^{18}O)$ de la droite des eaux météoriques locales sera également effectué.

Les analyses de l'oxygène 18 des sulfates dissous pour exploitation géothermométrique seront faites en 1984. On procédera aussi aux analyses isotopiques du strontium, aux mesures des teneurs en bromures et iodures. Ces trois paramètres sont précieux pour choisir entre multiplicité ou unicité des réservoirs.

D'autre part une étude géologique et hydrogéologique approfondie contribuera à la compréhension du système à l'échelle régionale. Cette étude a été initiée en 1983 par la collecte pour les stations les plus représentatives, de données continues sur 10 ans au moins des paramètres suivants : température, résistivité, chlorures, sulfates, bicarbonates. Des conclusions intéressantes pourront en être tirées notamment sur les temps de réactions des sources en fonction de la pluviométrie et sur les mécanismes de régulation des débits : Thermo-siphon ou augmentation des débits par mélange. Il sera alors peut-être possible de définir l'amplitude des réservoirs.

Tous ces paramètres complèteront les données chiffrées déduites des analyses chimiques pour fournir les bases d'un modèle complet des circulations hydrothermales dans ce massif.

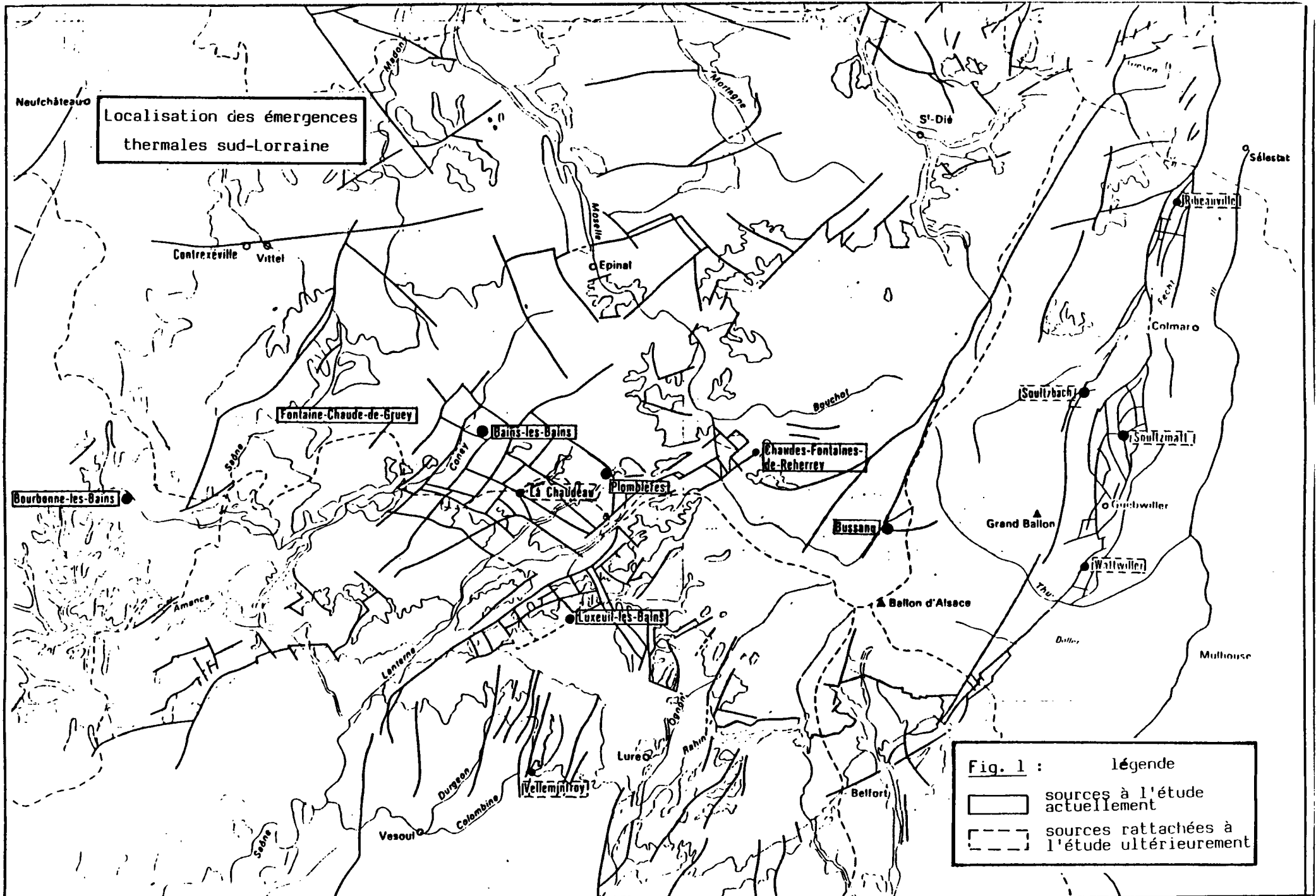
- ANNEXE -

Etude Bibliographique

- **Analyses B.R.G.M. - Luxeuil (1982) :**
sources boursaux, bénédictins martin
- **BAUBRON J.C. et al (1977) :**
Recherches géochimiques sur les eaux thermales d'Amélie-les-bains et
Plombières-les-bains
Seminar on geothermal energy, Brussels, 1977
- **BLOMMAERT W.C. (1983) :**
"Trace element geochemistry in geothermal waters and in waters related
to ore deposits"
Thèse de doctorat, Belgique
- **BOSCH B. - MARCE A. (1974) :**
Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin thermal de Plombières
au moyen des techniques isotopiques.
Rapport B.R.G.M.
- **FRITZ B. (1981) :**
Etude géochimique des systèmes hydrothermaux convectifs.
Le système hydrothermal de Plombières-les-bains. Mémoire n° 65, institut
de géologie, Strasbourg
- **GIJBELS et al (1976) :**
"Application of trace element analyses to geothermal waters seminar on
geothermal energy, Brussels, 1977
- **GRANDAROWSKI G. - RISLER J.J (1975)**
Eaux minérales et thermales
Mémoire du B.R.G.M. n° 87, géologie des gîtes minéraux des Vosges.
- **Laboratoire du Ministère de la Santé :**
Analyses régulières des sources thermales de 1960 à 1983.
- **MINOUX G. (1973)**
Etude hydrogéologique du bassin thermal de plombières - Campagne d'étude
62 - 73, rapport B.R.G.M.
- **RICOUR J. (1976) :**
Etablissement thermal de Bourbonne-les-bains : Etude hydrogéologique com-
plémentaire et compte-rendu de la campagne de travaux 1975-1976. Rapport B.R.G.M.
- **TARDY Y. (1977) :**
Conditions d'utilisation des géothermomètres chimiques. Cas du massif
de Plombières - Seminar on geothermal energy, bruxelles, 1977

- TARDY Y. (1980) :
Géothermomètres chimiques en terrains granitiques et sédimentaires,
Rapport, commission des communautés européennes, Bruxelles.

- WILLM et E. JACQUOT (1884) :
Les eaux minérales de la France
Librairie polytechnique, Baudry et Cie



**Localisation des émergences
thermales sud-Lorraine**

Fig. 1 : légende
 [Solid line] sources à l'étude
actuellement
 [Dashed line] sources rattachées à
l'étude ultérieurement

Echelle : 0 10 20 30 40 50 km

MILIEUX FISSURES DE SOCLE

CEZALLIER

C. Fouillac

AVERTISSEMENT

Le suivi et l'avancement du thème Cézallier est à présent assuré par le programme Géologie Profonde de la France (G.P.F.). Les travaux menés en 1983 à l'IMRG sur cette cible ont constitué en :

- participation au groupe de travail G.P.F.
- compléments d'études géochimiques.

Le premier point sera illustré par le résumé de la présentation des aspects géothermiques du projet, faits à Paris le 19 Octobre 1983 devant le Comité d'experts de l'A.F.M.E..

Le deuxième point concerne des compléments analytiques sur la zone :

- thermométrie par oxygène 18 de sulfates : prélèvements effectués en septembre, analyse actuellement en cours,
- étude détaillée des éléments traces As, Sb, sensibles aux phénomènes réduction oxydo ; étude terminée.

RESUME DE LA PRESENTATION FAITE PAR Cl. MEGNIEN et C. FOUILLAC

DEVANT L'AFME, le 19 Octobre 1983

LE PROGRAMME GEOLOGIE PROFONDE DE LA FRANCE

Ce programme a été initié en 1981 par le B.R.G.M. avec la collaboration du C.N.R.S. et de la Direction de la Recherche de l'Education Nationale. Il a été présenté publiquement, le 15 juin 1982, auprès de la Communauté Géologique Nationale.

Ce projet vise à développer considérablement la connaissance fondamentale de la géologie profonde de notre pays en donnant aux chercheurs un accès direct aux échantillons et aux expérimentations profondes permettant d'étudier en place le comportement des roches et des fluides. Les forages doivent être implantés sur des points-clés permettant de résoudre de grands problèmes structuraux, ou des phénomènes géodynamiques actuels ou passés. Ce projet s'inscrit tout particulièrement dans le cadre d'un effort international pour la connaissance de la lithosphère.

L'année 1983 est consacrée à l'étude préliminaire des cibles choisies en fonction de leur intérêt géologique et de leur faisabilité. Dans un premier temps, 11 sites ont été envisagés : (figure 1)

1. Reconnaissance du chevauchement varisque dans le Nord de la France,
2. Reconnaissance de l'anomalie magnétique du socle du Bassin de Paris,
3. Reconnaissance du socle et des bassins paléozoïques cachés sous l'Aquitaine,
4. Subsidence et diagenèse de la bordure ardéchoise du bassin rhodanien,
5. Allochtonie des unités alpines,
6. Allochtonie des massifs paléozoïques nord-pyrénéens,
7. Soubassement précambrien du domaine varisque,
8. Reconnaissance des chevauchements synmétamorphes de la zone interne varisque en Limousin (a) et en Vendée (b),
9. Reconnaissance d'un apex granitique,
10. Reconnaissance du massif du Mont Dore,
11. Géothermalisme : Cézallier.

Actuellement, les études sont en cours, une quarantaine de laboratoires y participent grâce au financemnet commun d'une A.T.P. par le B.R.G.M., le C.N.R.S. et l'Éducation Nationale. Les rapports permettront en 1983 de choisir les 3 ou 4 cibles privilégiées qui feront l'objet de travaux plus poussés permettant d'implanter le ou les premiers forages profonds vers 1985.

LA CIBLE "CEZALLIER" ET LES CONDITIONS GEOTHERMIQUES PROFONDES

Dans le cadre du programme évoqué ci-dessus, les recherches concernant le géothermalisme se sont focalisées sur la cible du Cézallier qui présente, comme nous allons le voir, un excellent modèle d'approche des phénomènes intervenant dans le géothermalisme. C'est d'ailleurs un des projets les plus avancés du programme GPF et les travaux préalables sont en cours de réalisation par une dizaine de laboratoires du C.N.R.S. ou de l'Université (Clermont, Montpellier, Paris VI et VII, Garchy...) et 5 départements du B.R.G.M. (IMRG, Géologie, Géophysique, Géothermie, Laboratoires).

La partie médiane du Massif Central et la région du Cézallier (figure 2) en particulier se trouvent au centre d'anomalies d'origine profonde :

- a) c'est tout d'abord une des régions où le flux de chaleur est anormalement élevé (VASSEUR, 1982) et où il existe une importante activité hydrothermale (les sources qui apparaissent dans cette zone ne sont pourtant pas captées, ce qui laisse une certaine liberté d'action pour réaliser des expérimentations par forage ;
- b) c'est une zone de distension géodynamique qui a eu une activité volcanique importante de type fissural au Mio-Pliocène et qui a été réactivée par la suite (Pavin) ;
- c) cette région se trouve à l'aplomb d'un amincissement crustal et d'une remontée diapirique du manteau :
 - . elle est au centre de la zone à enclaves de péridotites dans les produits volcaniques (enclaves équigranulaires déformées) (COISY et NICOLAS, 1978) montrant ainsi la proximité du manteau ;

- . elle correspond à une zone d'amincissement crustal déterminée par sismique avec des isobathes du Moho vers une profondeur de 25 km seulement. De plus, c'est également une zone de manteau anormal (PERRIER et RUEGG, 1973) en forme de coussin avec des vitesses des ondes P plus faibles (7,2 km/s) ;
- . elle correspond enfin à des anomalies gravimétriques qui sont le reflet d'une anomalie de grande longueur d'onde centrée toujours sur la même région (LUCAZEAU, VASSEUR, 1981).

La figure 3 résume quelques résultats de géophysique évoqués ci-dessus.

La région envisagée pour le site de forage se trouve à une dizaine de kilomètres au NW de Massiac. Sur le plan géologique, elle présente un intérêt capital car elle est située sur un des points-clés de la chaîne varisque où l'on peut observer le chevauchement synmétamorphe de nappes de socle. La fenêtre tectonique de Massiac laisse affleurer l'unité autochtone des schistes et orthogneiss sur lesquels vient en discordance l'unité allochtone des leptyno-amphibolites et anatexites.

Un des buts du forage est aussi de carotter en continu pour la première fois cet accident majeur de la chaîne varisque.

LES MANIFESTATIONS GEOTHERMIQUES DE SURFACE

Au cours de travaux préliminaires réalisés dans cette zone en 1981-1983 pour le compte du Ministère de l'Industrie, l'attention a été attirée par l'existence d'une trentaine de sources minérales froides ou tièdes qui présentent des caractéristiques chimiques étonnantes d'après les résultats obtenus :

- l'extension des aires d'émergence est très impressionnante, elle correspond soit à des systèmes convectifs de grande taille, soit à des dispersions importantes de plus petits systèmes par des eaux subsuperficielles et donc à des zones de circulation intense ;
- deux groupes de source ("St Hérent" au Nord et "Chantejail") se distinguent par leur composition chimique et isotopique homogène. A l'intérieur de chacun de ces groupes, des corrélations excellentes entre les divers éléments dissous font admettre une origine commune dans des réservoirs "profonds", les différences de minéralisations résultant de mélanges plus ou moins importants avec les eaux superficielles, fig. 4 et 5 ;
- les estimations de température profonde, réalisées sur chacun des groupes avec les géothermomètres chimiques classiques concordent étonnamment bien pour des valeurs très proches de 200° ;
- la contradiction entre ces prédictions très élevées et les basses températures d'émergence pose un problème. Elle peut résulter des phénomènes de colmatage superficiel très intenses qui sont observés. La zone est en effet caractérisée par des dépôts de travertins carbonatés très fréquents et bien développés. On est ici en présence d'un système quasiment scellé. Les débits actuels très faibles peuvent ainsi provoquer des pertes thermiques conductives importantes. Le modèle géochimique global implique aussi l'existence d'une étape de colmatage à silice beaucoup plus enfouie ;

- l'aspect thermométrique quantitatif est renforcé par la présence en quantité importante de composés tels Rb, Cs, As, Sb qui sont maintenant connus pour passer en solution lors d'interactions roche-eau de haute température et dans ce cas là seulement.

Bien que totalement cohérent de façon interne, ce modèle est basé sur un petit nombre d'hypothèses réalistes dont les ultimes vérifications ne peuvent être obtenues que par un forage profond.

RESULTATS ATTENDUS D'UN FORAGE PROFOND

Dans cette région, un forage profond apportera de très précieuses données géologiques et géothermiques. On peut relever notamment :

- . La compréhension des systèmes hydrothermaux carbogazeux

Ces systèmes correspondent -ils à une phase finale du refroidissement des systèmes géothermaux de haute énergie ou bien représentent-ils le terme supérieur d'une succession dans l'espace de systèmes convectifs différents superposés ?

Sont-ils liés spatialement aux systèmes chlorurés sodiques classiques de haute enthalpie plus enfouis ou décalés ? Les systèmes carbogazeux ont été peu étudiés jusqu'à présent, ils sont néanmoins très fréquents dans les zones géothermales. Ils s'interprètent de plus en plus fréquemment comme les "toits" ou bordure des chambres de convection. Ils ont été également reconnus par forage dans des zones de moyenne enthalpie (175-190°) sans manifestation de surface particulière. De fait, on ne peut pas exclure l'existence sous la zone étudiée de systèmes chlorurés classiques de haute enthalpie (> 250°) séparés des systèmes carbogazeux par des silicifications intenses ;

- . La connaissance des paramètres de la circulation des fluides en milieu fissuré

Quelles sont les interactions entre les conditions de fracturation du milieu, les contraintes mécaniques et les gradients thermiques et hydrauliques ? Quelle est, dans ces conditions, l'impact de la composition chimique des eaux et l'importance des phases gazeuses ? La recherche et la détermination de ces paramètres doivent permettre de modéliser les écoulements de ce type et de comprendre le mécanisme des différents systèmes hydrothermaux connus ;

- . L'approche in situ des interactions fluides-roches

Détermination des équilibres chimiques et physico-chimiques des fluides en fonction du milieu rocheux, de la nature de la matrice et des surfaces, des contraintes imposées au fluide. Variations spatiales de ces caractères, variations dans le temps déduites des dépôts et altérations hydrothermales du bâti rocheux ;

- . L'évaluation de possibilités géothermiques nouvelles

Si les systèmes carbogazeux recouvrent bien des zones sous-jacentes de plus haute enthalpie, c'est une ressource nouvelle de moyenne énergie qui peut être mise en évidence dans de nombreuses régions. La zone du Cézallier

peut être prise comme très caractéristique de ce type de système que l'on rencontre fréquemment dans le Massif Central (chaîne des Puys, Ardèche, Velay, Sancy-Mont Dore, Limagne d'Allier, Sud-Ouest Limagne de Loire), Sud Alsace, Corse orientale. A l'issue de ces travaux, l'évaluation des ressources géothermiques françaises peut s'en trouver modifiée.

Figure 1

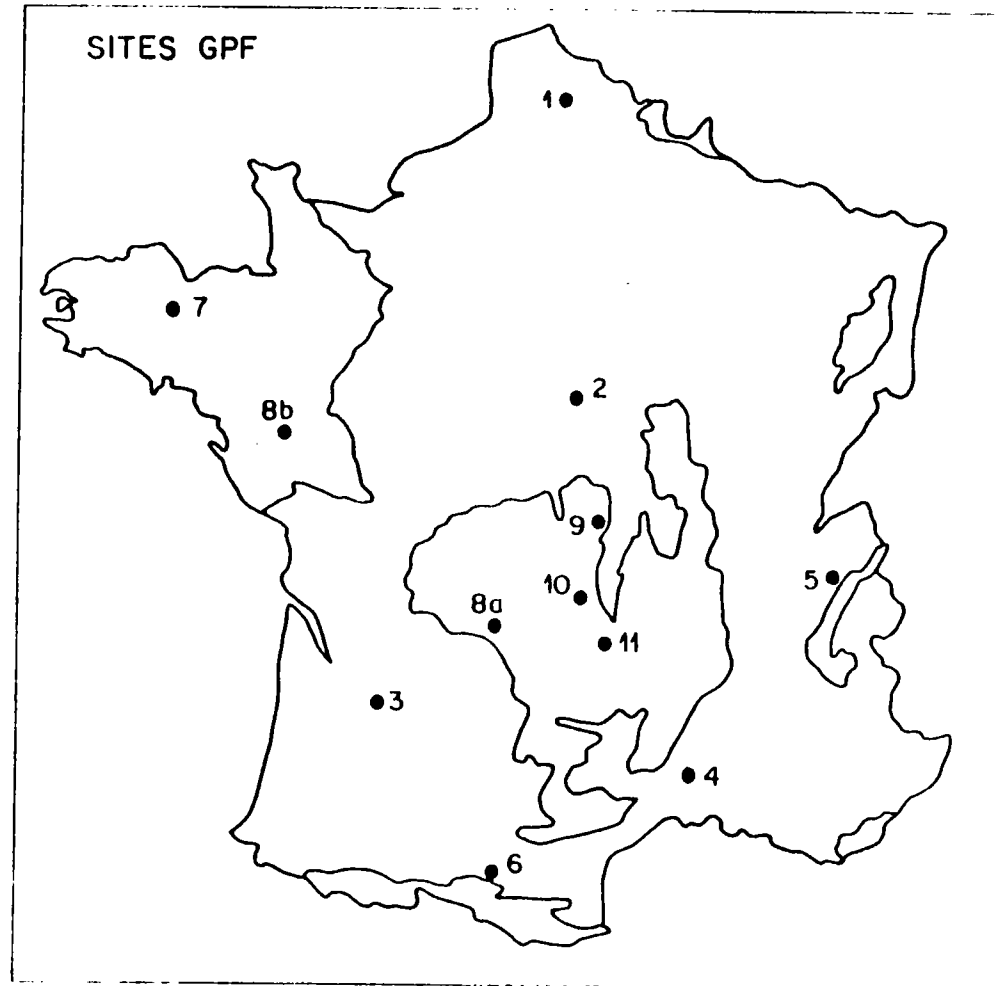


Figure 2

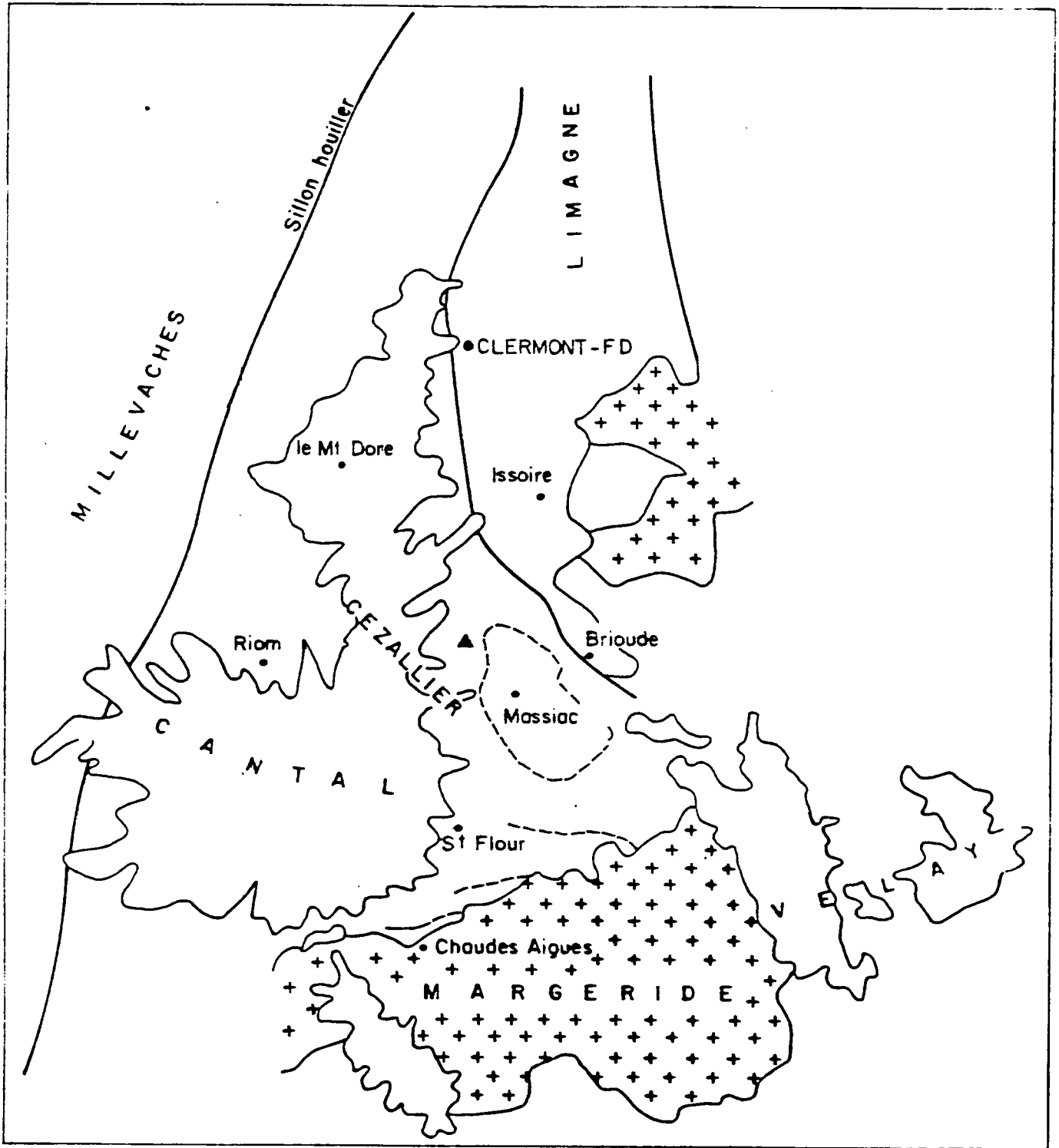
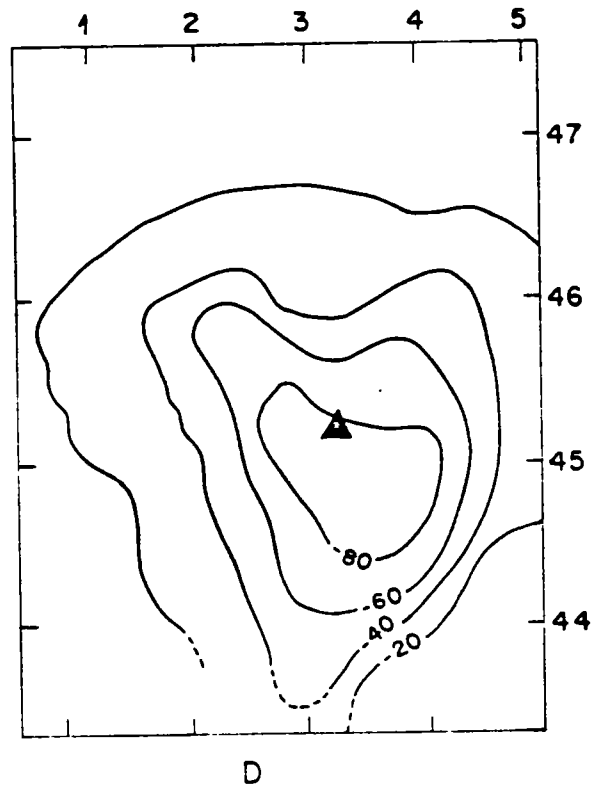
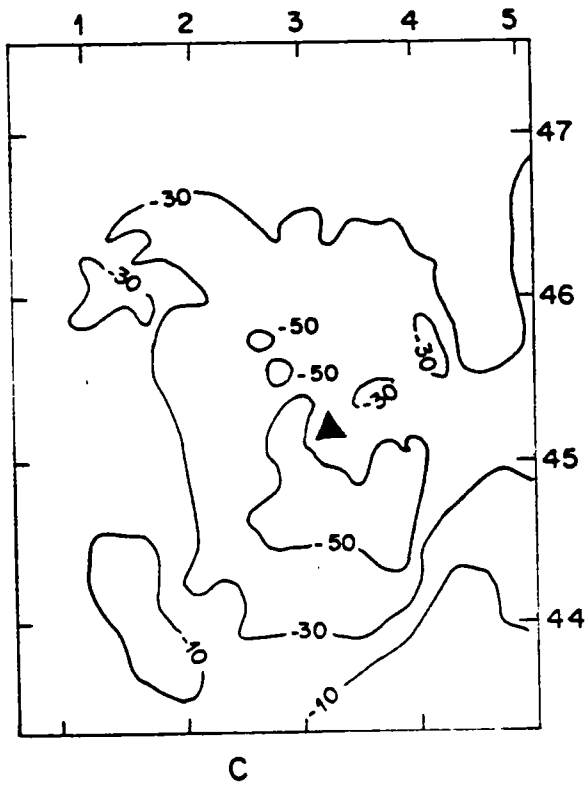
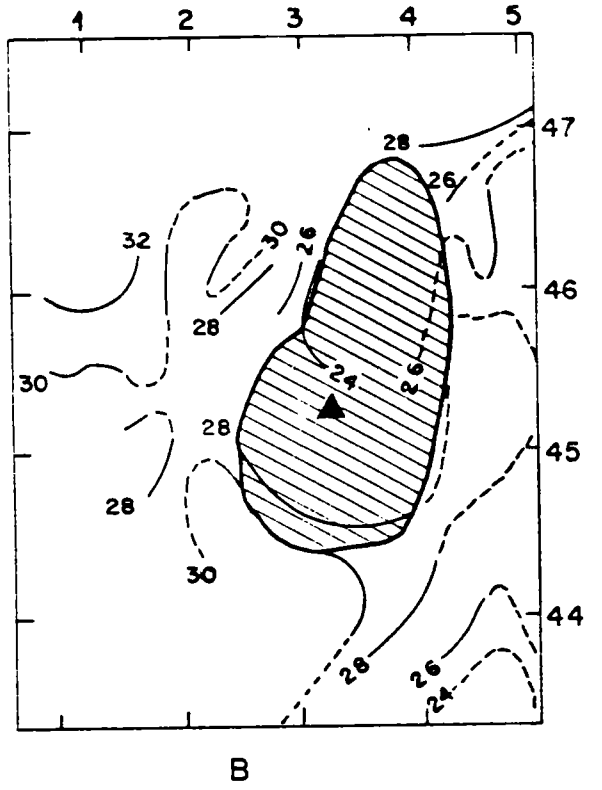
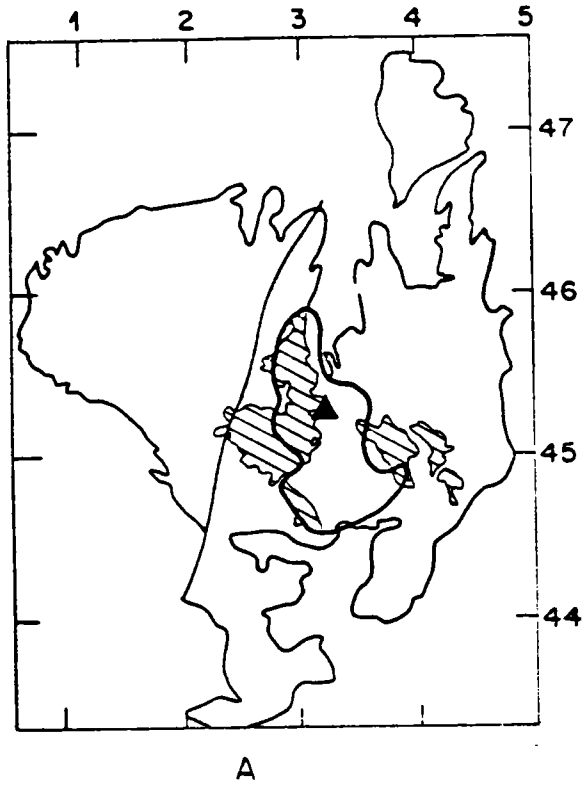


Figure 3



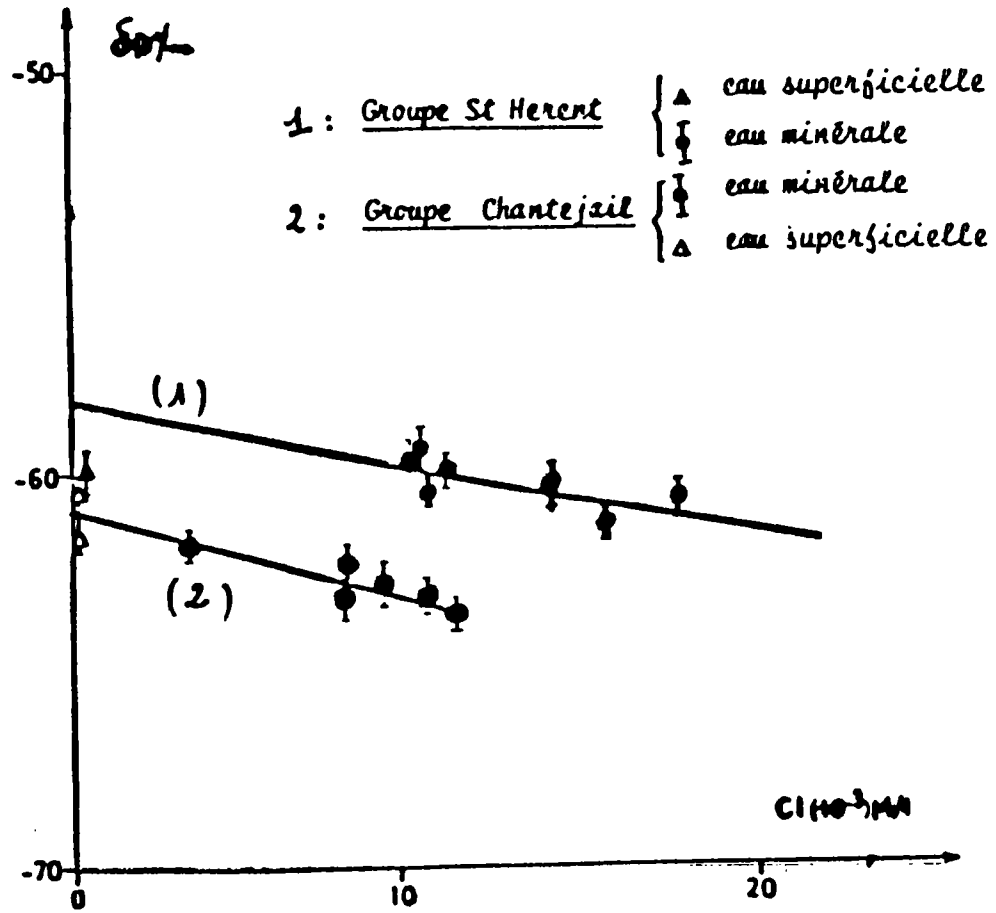
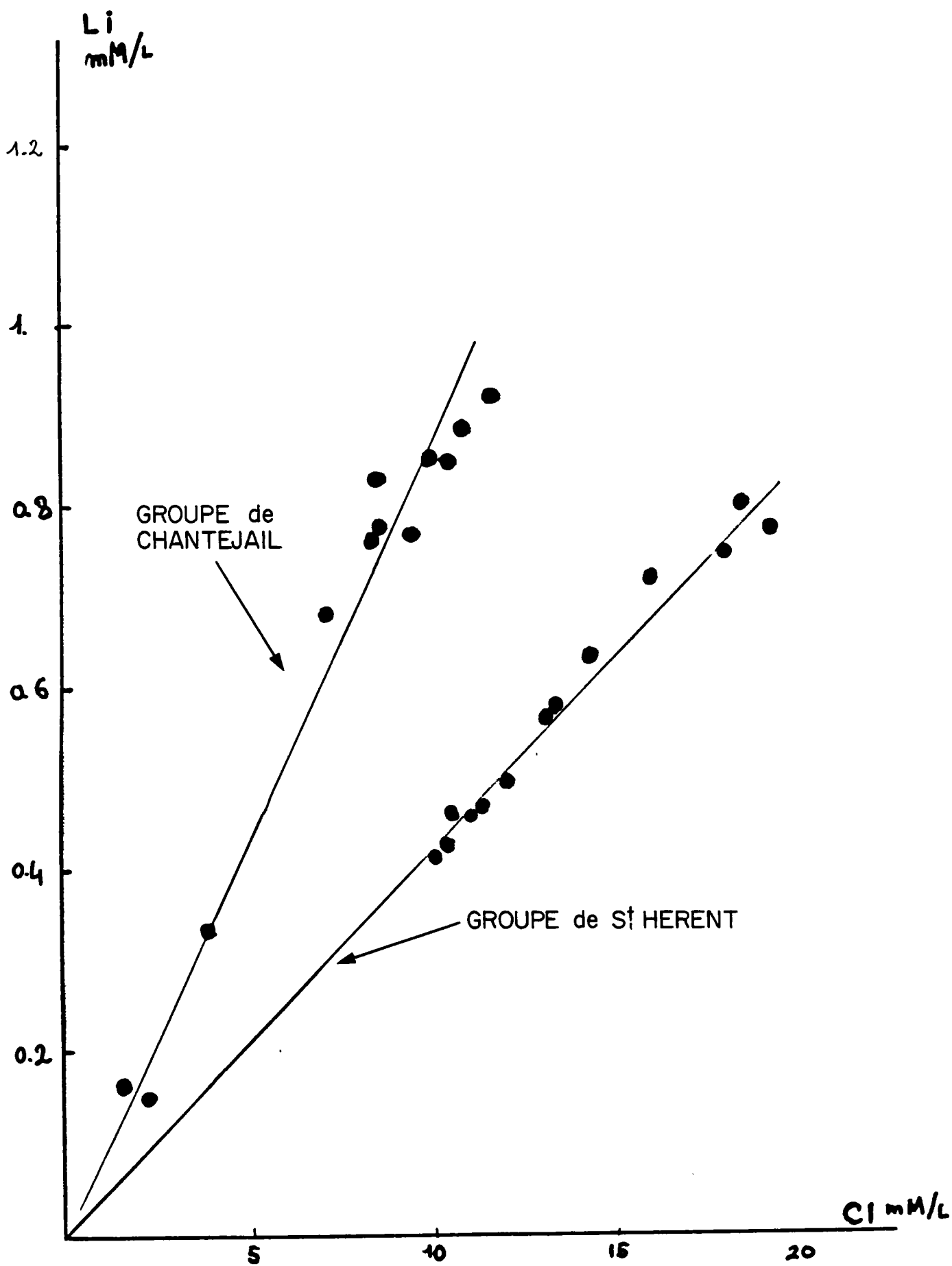


FIGURE 4

FIGURE 5



ETUDE COMPAREE DES SYSTEMES HYDROTHERMAUX DES PYRENEES CENTRALES ET DE LA BULGARIE DU SUD OUEST

C. Fouillac* - A. Criaud** - D. Garcia* - E. Pentcheva***

INTRODUCTION

Un programme portant sur l'étude comparée des systèmes hydrothermaux pyrénéens et bulgares a été entrepris. Ces systèmes relèvent du domaine de basse et moyenne enthalpie (60-140°) mais présentent des particularités chimiques très intéressantes : pour une température profonde donnée, les compositions chimiques des fluides en éléments majeurs sont exactement semblables, indépendamment de la minéralogie et de la chimie initiale des roches réservoirs. Ces résultats s'expliquent bien maintenant par des concepts d'équilibre eaux-minéraux néoformés et par des notions de rejets des phases. Cette situation nous a semblé idéale pour tester si la géochimie des éléments traces en solution pouvait être utilisée pour identifier la roche réservoir, (granite, gneiss...) dans une situation où la chimie des majeurs est constante. Les bulgares et en particulier E. PENTCHEVA, ont développé une géochimie des traces tendant à fournir ces critères d'identifications.

RESULTATS ACQUIS EN 1983

Au cours d'un séjour de 3 semaines de E. PENTCHEVA à l'IRG, une mission a été effectuée dans les Pyrénées (10-20 Octobre) et 15 échantillons prélevés en vue d'analyse détaillée. Les stations suivantes ont été échantillonnées :

Luchon	4 sources	15 < t° < 70°C
Loudenvielle	1 source	27.7°C
Eget	1 source	24.5°C
Cadeac	1 source	14.6°C
Gazost	1 source	15.8°C
Labasseyre	1 source	15.7°C
Crastes	1 source	19.5°C
Bagnet	1 source	12.8°C
Barèges	1 source	43.7°C
Luz St Sauveur	1 source	27.3°C
Beaucens	1 source	13.4°C
Barzun	1 source	25.6°C

Outre la température, les paramètres suivants ont été mesurés sur le terrain : pH, Eh, Alcalinité totale.

De plus les espèces réduites du soufre ont été immobilisées sur le terrain par précipitation à l'acétate de cadmium en vue d'un dosage électrochimique en laboratoire. L'ammoniaque NH₃ a été dosé en laboratoire après blocage sur le terrain.

- . Les analyses détaillées: majeurs, traces, isotopes (O, H) sont en cours.
- . L'étude de ces systèmes est très instructive pour comprendre les

* IMRG

** Dépt. MGA BRGM

*** Académie bulgare des Sciences - Sofia

mécanismes d'oxydation des espèces réduites du soufre.

Ces eaux pyrénéennes sont beaucoup plus réduites que celles étudiées en Lorraine (cf. "Etude Sud-Lorrain").

	Eh mv	pH _a t émergence	Al ⁰ _C alcalinité totale (en mole)
Pyrénées	- 200	8.78	2.58
Lorraine	- 40	8.6	

Ceci renforce l'idée de l'existence d'épisodes intenses d'oxydation dans la région Lorraine.

L'étude des éléments traces permettra une comparaison avec les systèmes carbogazeux étudiés par ailleurs (cf. Méthodes explorations Haute énergie).

Bien que l'objectif du programme soit essentiellement méthodologique on obtiendra des estimations de température profonde et des caractérisations isotopiques des réservoirs, les résultats pourront alors servir à l'estimation du potentiel géothermique des systèmes hydrothermaux de la zone axiale des Pyrénées.

PROGRAMME 1984

Poursuite des analyses et interprétations concernant les Pyrénées.

Une étude semblable doit se dérouler en Bulgarie.

Les travaux porteront sur les transformations des eaux thermales azotées des terrains granitiques, provoquées par l'introduction graduelle de CO₂ dans le système (zone des Rhodopes).

Les principaux points abordés seront :

- . la composition en éléments majeurs ;
- . les analyses isotopiques ;
- . l'étude des éléments traces.

En outre, des études expérimentales de l'interaction eau-gaz-roche seront réalisées à l'Institut de l'Académie Bulgare des Sciences.

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.
B.P. 6009
45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.
27, Rue Louis Vicat
75015 PARIS

- EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE -

- Document provisoire -

C O N F I D E N T I E L

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE

MOYENNE ENTHALPIE

A. BOISDET

OBJECTIF : EXPLOITER UNE RESSOURCE ABONDANTE ET PEU CONNUE :

Les ressources géothermales à moyenne enthalpie, température entre 80 et 180°C, ont souvent été mises en évidence lors des campagnes d'exploration pour découvrir des ressources des haute énergie.

Cette ressource peut soit être utilisée directement, soit servir de source chaude pour un procédé thermodynamique.

Il s'agit d'une ressource encore mal localisée. Son exploitation peut présenter des difficultés en raison de la forte minéralisation de certaines saumures et de leur agressivité.

Les difficultés d'exploitation, ou les limitations d'exploitation, dues à la qualité des saumures conduisent à rechercher de nouvelles techniques permettant de s'affranchir d'un échangeur de type classique en tête de puits et de la pompe d'exhaure immergée.

C'est l'analyse de cette situation qui a conduit à structurer le programme de l'IMRG selon deux axes principaux :

- analyse de la ressource d'après les données existantes,
- développement du concept d'échange direct en géothermie moyenne enthalpie.

Dans l'utilisation de l'échange direct le fluide de travail est directement mélangé à l'eau de formation. Si l'échange a lieu en tête de puits, les problèmes liés à l'échangeur de l'évaporateur sont supprimés ; si l'échange a lieu dans le puits, par effet de gaz lift, on supprime la pompe d'exhaure.

RESULTATS ACQUIS :

Collecte et mise en forme de données de base

Les données existantes :

- rapports du BRGM sur les ressources géothermiques,
- documents rassemblés par la Sté Alsthom,
- documents préparatoires à la conférence de Nairobi (conférence des Nations Unies sur les sources d'énergies nouvelles et renouvelables entre le 10 et 21 août 1981),

- enquêtes de la banque mondiale et des banques régionales de développement,

sont en cours de mise en forme.

Parallèlement une première typologie fondée sur la chimie des eaux, le couple débit-température, le coût prévisionnel d'exploitation, lié à la profondeur des nappes et à la nécessité, ou non, de réinjecter (impact sur l'environnement ou gestion de la ressource) permet de classer les différents gisements.

Travail de thèse de J.L. HONEGGER concernant la valorisation thermodynamique de la ressource par cycle binaire à échange direct

- A - Synthèse des travaux sur l'échange direct en géothermie et dans d'autres domaines.

L'étude des publications concernant l'échange direct en géothermie et l'examen des résultats des essais des centrales prototypes qui ont été construites, a fait l'objet d'un premier rapport.

- B - Le modèle mathématique théorique permettant de dimensionner ce type de centrale a été informatisé.
 - échange direct dans le puits avec (ou non) échange complémentaire en tête de puits,
 - comportement du séparateur,
 - problèmes liés aux incondensables qui s'accumulent au condenseur,
 - turbine et énergie de pompage.
- C - Conception et essais d'un modèle réduit d'échange direct dans un puits.

Cette réalisation vise à contrôler la validité des résultats concernant les coefficients d'échange de chaleur volumique dans le puits. Une analyse dimensionnelle (délicate) devrait donner le domaine de validité des résultats à attendre.

PROGRAMME EN COURS :

Au niveau de la ressource

- Esquisse d'une typologie des besoins énergétiques dans les zones où la ressource a été constatée où elle est très probable. Il s'agit de répartir de manière sommaire les besoins de chaleur (chauffage, séchage, production d'alcool, etc.), les besoins de froid, d'électricité locale.
- Analyse sommaire de la situation économique des énergies concurrentes.

Au niveau de l'exploitation de la ressource

A - Filière thermodynamique

- Mise au point d'un projet détaillé d'une centrale prototype à échange direct.

B - Autres filières

- Analyse détaillée des autres filières de valorisation de la ressource.

COLLABORATIONS EXTERIEURES :

. CENG à Grenoble pour les problèmes liés à l'échange direct entre une saumure et un fluide de travail (Isobutane) : modèle théorique du transfert de masse et de chaleur.

. CEA Cadarache pour la conception générale d'une boucle expérimentale et les problèmes liés à la séparation du fluide de travail et de la saumure.

. Des contacts industriels ont été pris avec Alstom et Creusot Loire.

TECHNOLOGIE DE L'ECHANGE DIRECT POUR LA VALORISATION THERMODYNAMIQUE DES RESSOURCES GEOTHERMALES A MOYENNE ENTHALPIE

J.L. Honegger

INTRODUCTION

La conversion thermodynamique de la chaleur des saumures géothermiques se heurte aux problèmes classiques d'opération en milieux entartrants et corrosifs. Aussi l'optimisation des procédés doit tenir compte non seulement des caractéristiques connues des machines thermiques, mais aussi de cet environnement géothermique. On trouve dans la littérature de nombreux exemples des centrales électriques adaptées à une source chaude dans la gamme de température envisagée (100-200°C). Mais si on exclut le cas exceptionnellement favorable où la saumure est très peu chargée en sels, non corrosive et suffisamment pressurisée, il se pose toujours le problème essentiel du générateur de vapeur où se situe le contact entre une technologie connue presque "clef en main" et une ressource à la fois variable et contraignante d'un point de vue physico-chimique.

LES ECHANGEURS PRIMAIRES A CONTACT DIRECT

Le choix d'un échangeur primaire (préchauffeur/bouilleur) repose sur trois paramètres principaux :

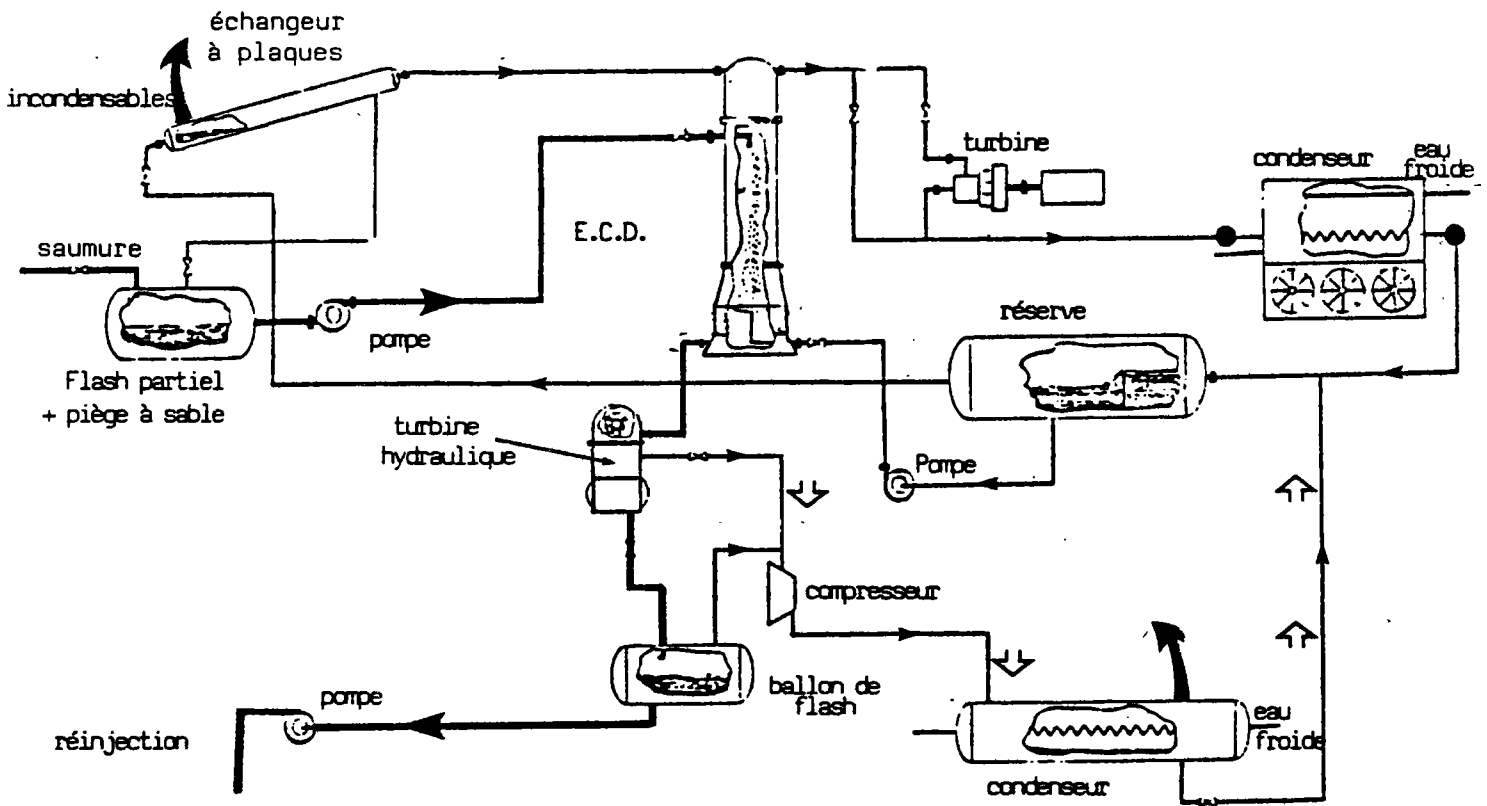
- le choix du matériau employé qui doit résulter d'une étude très précise des caractéristiques électrochimiques de la saumure,
- le choix de la surface d'échange minimisé par la thermodynamique du cycle est aussi une fonction des vitesses d'entartrage pour obtenir des coefficients thermiques d'échange ne chutant pas avec la durée de fonctionnement,
- le prix qui se déduit d'une optimisation des paramètres précédents, en sachant que le prix d'un échangeur est multiplié approximativement par 2 (rapport à l'acier ordinaire) en employant de l'acier au chrome, par 5,6 pour de l'inox au titane et par 48 pour du titane, et que le surdimensionnement imposé par les dépôts possibles multiple encore ces coefficients.

Pour pallier à ces obstacles, la recherche dans ce domaine s'oriente vers des échangeurs ne comportant aucune séparation matérielle entre les fluides :: les échangeurs à contact direct (E.C.D.). Des expériences américaines sur des réalisations prototypes de centrales à E.C.D. montrent la faisabilité technique et économique des E.C.D. à contre courant, en tête de puits. Le dimensionnement et le fonctionnement de tels E.C.D. prouve que leur simplicité est compatible avec une taille relativement réduite et des transferts thermiques suffisants. Ils ont le triple avantage de ne pas présenter de corrosion ou d'encrassement de la surface d'échange tout en étant un investissement faible.

D'un autre côté, l'emploi d'E.C.D. transforme le cycle de Rankine classique (évaporation/détente/condensation/compression) en imposant la présence de récupérateur de fluide de travail à divers endroits du cycle, ainsi que l'évacuation de gaz incondensables. En effet le transfert thermique par contact direct induit un transfert de masse entre les fluides : de la vapeur d'eau et des gaz incondensables sont entraînés avec les vapeurs du fluide de travail, tandis qu'une infime partie de celui-ci (sa miscibilité très faible étant un critère fondamental de son choix) se retrouve dans les rejets de saumure.

Ces récupérateurs rendent le cycle plus complexe, mais ne sont pas de nature à remettre en question l'E.C.D. Par contre, les réalisations prouvent que les systèmes classiques d'exhaure et de pressurisation de la saumure restent très aléatoires quant à leur fiabilité.

Centrale Prototype à E.C.D. (East Mesa U.S.)



- ➡ Trajet de la saumure
- Trajet du fluide de travail
- ⇨ Récupération de fluide de travail
- ➡ Rejet des gaz incondensables

INTERET D'UN E.C.D. DANS LE PUIITS GEOTHERMIQUE

La majorité des problèmes autresque la corrosion provoquée par le milieu géothermal entre 100 et 200°C, c'est-à-dire les dépôts et les gaz incondensables, sont dus à la décompression de la saumure en amont de la pompe de pressurisation (la chute de la pression partielle de CO₂ provoquant l'expression de CaCO₃ solide est une augmentation du Ph qui favorise les dépôts sulfurés). La cinétique de redissolution de ces gaz, ainsi que les contraintes importantes du pompage en milieu diphasique ne permettent pas à ces gaz de repasser en solution ; il faut donc les évacuer et provoquer des risques de déposition à moins d'employer des agents chimiques.

La présence d'un fluide volatil injecté dans le puits à quelques centaines de mètres et se vaporisant, diminue énormément les pertes de charge hydraulique dues à la colonne hydrostatique par baisse de sa densité. Aussi, pour un débit raisonnable de fluide de travail et pour une pression de réservoir donnée on peut calculer une profondeur d'injection permettant une enthalpie du milieu diphasique (saumure/fluide de travail gazeux) en tête de puits capable, après séparation, de produire de l'énergie mécanique par détente à la fois du gaz avec un cycle de Rankine et de la saumure dans une turbine hydraulique.

RESULTATS ET CONCLUSION

Une bibliographie importante ainsi que des expériences en cours au C.E.N.G. traitent des coefficients d'échanges thermiques entre phases non miscibles (liquide/liquide et liquide/gaz). Ces coefficients ont permis un début de modélisation informatique (VAX) du comportement du puits géothermique fonctionnant en E.C.D.

Le bilan énergétique d'un tel E.C.D. donc à co-courant (températures des deux fluides sensiblement égales en tête de puits) peut être amélioré par la présence d'un E.C.D. de préchauffage à contre-courant en tête de puits sur le fluide de travail avant injection. Les rejets géothermiques se font alors à température plus basse, ceci favorisant le bilan d'énergie.

La puissance de pompage nécessaire est ici créée par une légère détente du fluide de travail dans le puits, ce qui correspond à un moteur thermique donc limité du point de vue rendement. Mais dans le pompage classique avec moteur électrique, l'énergie provient aussi d'un moteur thermique (cycle de Rankine) qui subit en plus les chutes de rendement de la chaîne mécano-électrique (turbine, boîte de vitesse, alternateur, câblage, moteur électrique, pompe), mais aussi les problèmes liés à la maintenance de la chaîne.

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.

B.P. 6009

45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.

27, Rue Louis Vicat

75015 PARIS

- STOCKAGE ET POMPES A CHALEUR -

- Document provisoire -

C O N F I D E N T I E L

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

POMPES A CHALEUR POUR L'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE DE SUBSURFACE ET STOCKAGE THERMIQUE A MOYENNE PROFONDEUR

A. Menjz

Le milieu souterrain, en raison de sa diversité, de sa capacité calorifique et des apports énergétiques permanents qu'il reçoit (flux géothermique, flux solaire, apports météoriques) constitue ou peut constituer un énorme réservoir d'énergie sous la forme de chaleur sensible.

Ce thème de recherche concerne tout d'abord l'exploitation des ressources à faible et moyenne profondeur, d'où l'association de plus en plus fréquente des pompes à chaleur et du stockage afin d'adapter les caractéristiques de la ressource au niveau requis des besoins.

D'autre part, seuls certains procédés ou filières sont choisis, en fonction des connaissances et de l'acquit théorique et pratique de l'équipe. Les objectifs généraux de la démarche peuvent ainsi être résumés en 4 points :

- identifier les systèmes et sélectionner certaines filières (études générales),
- confronter les prévisions théoriques à la réalité (expériences à l'échelle, pilote, suivi),
- préciser les critères de faisabilité et de choix (cartographie, inventaire, bilans réels),
- fournir les éléments pour assurer la promotion de ces procédés.

Le programme comporte deux volets qui se différencient par la profondeur et la température de la ressource naturelle ou artificielle à exploiter et à gérer :

- a) L'exploitation et la valorisation des ressources thermiques de subsurface par l'emploi de pompes à chaleur,
- b) L'étude d'un projet de stockage thermique à moyenne température et moyenne profondeur (500 à 1000 m) en aquifère.

STOCKAGE INTERSAISONNIER

A MOYENNE TEMPERATURE ET MOYENNE PROFONDEUR

A. Boisdet

I - DEFINITIONS GENERALES

Le niveau de température envisagé, inférieur à 80°C, peut être qualifié de moyen en comparaison avec les autres types de stockage envisagés. Les stockages à haute température à plus de 150°C comme le projet CEA-ELF de Plaisir (ce niveau de température correspond à l'utilisation des réseaux de chaleur existant généralement conçus pour transporter de l'eau surchauffée à 180°C ou de la vapeur à 110°C ou plus).

A l'autre extrême on trouve les stockages en nappes phréatiques, ou peu profondes comme pour le projet de l'immeuble de la CGT à Montreuil (aquifère à 80 m), avec des températures ne dépassant pas 30°C. Le bas niveau de température implique le recours à des pompes à chaleur.

La notion de moyenne profondeur correspond à une comparaison avec la profondeur courante des forages de géothermie de l'ordre de 1700 à 2000 m. Dans le cas présent, les profondeurs visées sont de l'ordre de 500 à 1000 m, voire 1500 m, si les conditions géologiques le justifient.

2 - UNE SOLUTION POSSIBLE AU "VIEUX" PROBLEME DU STOCKAGE INTERSAISONNIER

a) Le stockage de l'énergie solaire pour le chauffage domestique

La disponibilité est énorme puisque le "gisement" solaire annuel est en moyenne en France de l'ordre de 1200 à 2000 kWh/m² soit de 47 à 86 milliards de Tep par an, à comparer avec la consommation annuelle française, toutes énergies confondues, qui était de 192 millions de Tep en 1970.

b) Un autre gisement possible est constitué par les effluents thermiques industriels ce qui représente un potentiel d'environ 24 MTep auxquels il faudrait ajouté les 42 MTep résultant de la production d'électricité thermique.

c) Le cas des usines d'incinération des ordures ménagères (UICM) est particulièrement intéressant. Le potentiel récupérable est très important : de l'ordre de 800 000 Tep. De plus les températures, dans la mesure où il s'agit d'une combustion, peuvent prendre pratiquement toutes les valeurs techniquement intéressantes (de 50 à 200°C) afin de produire de l'eau chaude, de la vapeur ou de l'eau surchauffée ; on peut même aller au-delà grâce à l'emploi de "fluides thermiques" (gilotherms).

Les UIOM sont gérées par les collectivités locales (municipalités, ou SIVOM dans la plupart des cas) ce qui permet une relative cohérence juridique avec des utilisateurs potentiels ou des organismes publics ou parapublics (HLM, sociétés d'économies mixtes, etc...)

3 - ANALYSE TECHNIQUE DES PARAMETRES DE REALISATION D'UNE OPERATION DE CHAUFFAGE UTILISANT UN STOCKAGE INTERSAISONNIER A MOYENNE PROFONDEUR, A MOYENNE TEMPERATURE.

a) Nécessité d'un couplage à une demande importante à bas niveau

En raison des techniques mises en oeuvre le seuil de rentabilité impose des opérations relativement importantes, du même ordre de grandeur que les opérations de géothermie classiques soit environ 1000 équivalents logements au minimum ; ce qui représente une économie d'énergie annuelle prévisible de l'ordre de 1500 à 2000 Tep pour une opération ayant un temps de retour brut voisin de dix ans.

Par ailleurs le niveau de température envisagé joint à la dégradation inéluctable par conduction dans l'aquifère et les épontes (éventuellement accéléré par les phénomènes de convection) conduisent à rechercher une utilisation maximale grâce à un réseau à la température la plus basse possible, à l'aller et au retour.

L'hypothèse de l'emploi de pompes à chaleur (dont l'énergie motrice, pour des raisons évidentes, sera préférentiellement le gaz) est à considérer. Toutefois, le schéma énergétique s'en trouverait compliqué ainsi que les conditions de la rentabilité économique.

b) configuration possible d'un pilote de stockage en doublet

A ce stade il est possible de s'interroger sur la nécessité du stockage en puits simple ou en doublet.

Dans la première hypothèse l'eau "de stockage" prélevée en surface est injectée et une fois la chaleur récupérée, durant la phase d'exploitation, elle est rejetée à l'égout. Ce type de fonctionnement est particulièrement risqué. En premier lieu l'eau que l'on restitue à l'environnement n'a plus les mêmes caractéristiques et risque dans les cas défavorables d'être nocive pour l'environnement.

En second lieu le mélange, au sein de l'aquifère, d'eau de compositions chimiques différentes risquent d'aggraver les problèmes géochimiques prévisibles, dus aux différences de conditions thermodynamiques, et induire des phénomènes de colmatage redibitoires. Ainsi qu'il a été constaté lors de la première phase des essais au puits unique sur le site d'Auburn aux USA.

Selon la seconde hypothèse, il est possible d'espérer une gestion hydraulique plus constante du réservoir dans la mesure où les pressions se compensent globalement. D'autre part, au phénomène d'entraînement de particules prêt, et sous réserve d'une thermodynamique chimique non pénalisante, on peut espérer une limitation des problèmes de compatibilité, dans la mesure où l'eau était en équilibre (depuis longtemps) avec la roche réservoir. De plus, les problèmes de pollution de surface sont éliminés.

Enfin, qui peut le plus peut le moins, si la faisabilité en doublet est démontrée, il sera possible d'améliorer la rentabilité du système en fonctionnant en puits unique si l'innocuité des eaux de travail, à la fois en surface et dans le réservoir, peut être établie à l'issue d'une série de simulations et d'essais.

c) Descriptif d'un système de stockage par doublet

Il ne s'agit pas là de décrire dans le détail les différents scénarios de fonctionnement possibles, mais de conduire une brève réflexion sur des différents fonctions qu'il est légitime de prévoir et, corrélativement, d'apporter des aperçus sur les organes propres à les satisfaire.

Le schéma proposé à la figure 1 tient compte des matériels actuellement disponibles et il est possible d'y apporter un grand nombre de variantes. En particulier il est possible de recourir au réseau EDF pour la fourniture électrique avec des limitations évidentes (rendement global en énergie primaire, pour la fourniture d'électricité inférieure à 30 %, tarif pénalisant en hiver durant la saison de chauffe, etc...), ou bien d'envisager des pompes immergées réversibles, ce qui permettrait de s'affranchir d'une unité de réinjection coûteuse. Par ailleurs, en raison de sa complexité le schéma de régulation n'a pas été représenté.

Ce schéma permet d'avoir une première approche des principaux problèmes énergétiques qui se posent au concepteur qui chercherait à optimiser le système savoir, de manière succincte :

- bilan énergétique de la force motrice.
- utilisation hivernale de l'énergie disponible au stockage et en provenance du producteur d'effluents thermiques.
- gestion de l'appoint énergétique indispensable (motone des puissances appelées).
- pérennité des caractéristiques hydrauliques du réservoir.

d) simulation théorique du fonctionnement du système et optimisation

La simulation repose sur une modélisation des besoins grâce à des hypothèses classiques et sur des hypothèses de comportements hydrothermiques des réservoirs qu'il s'agit de tester en vraie grandeur, ou du moins à une échelle significative au regard des opérations à envisager.

En ce qui concerne les besoins (B) on peut très grossièrement, retenir une hypothèse de linéarité par rapport à la température extérieure : $B = K\Delta T$ où K est un coefficient de proportionnalité fonction du volume à chauffer et des caractéristiques d'isolation des ouvrages, de leur coefficient architectural au regard des conditions microclimatiques (dans le cas d'un immeuble isolé K pourrait être du type $K = f(I, R, S, m)$ avec I = isolation, R = renouvellement d'air, S = apport thermique gratuit (solaire, etc...), m = paramètre microclimatique tenant compte de l'exposition aux vents dominants par exemple).

SYSTEME DE STOCKAGE DE TYPE Puits CHAUD Puits FROID

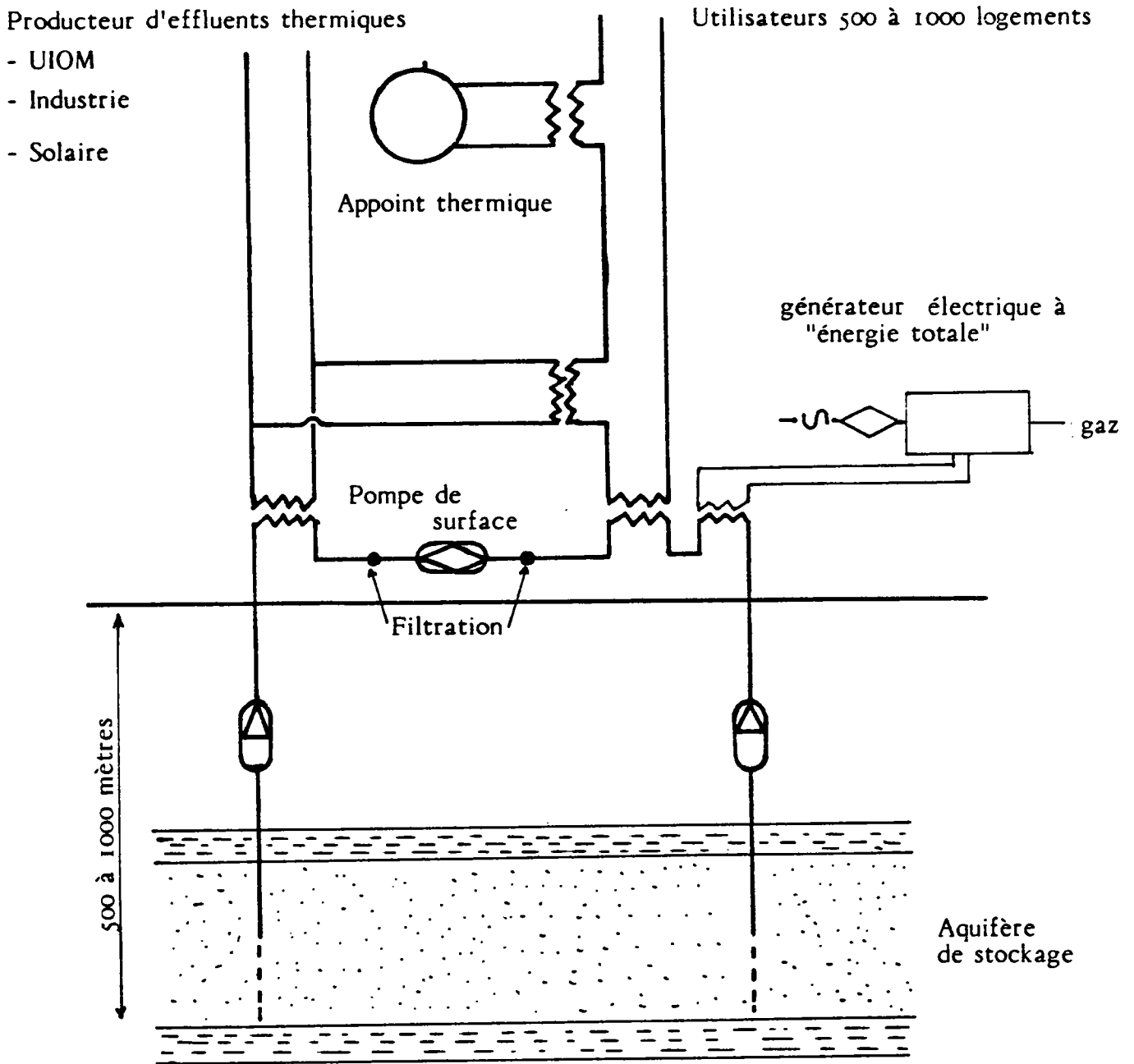


FIGURE 1

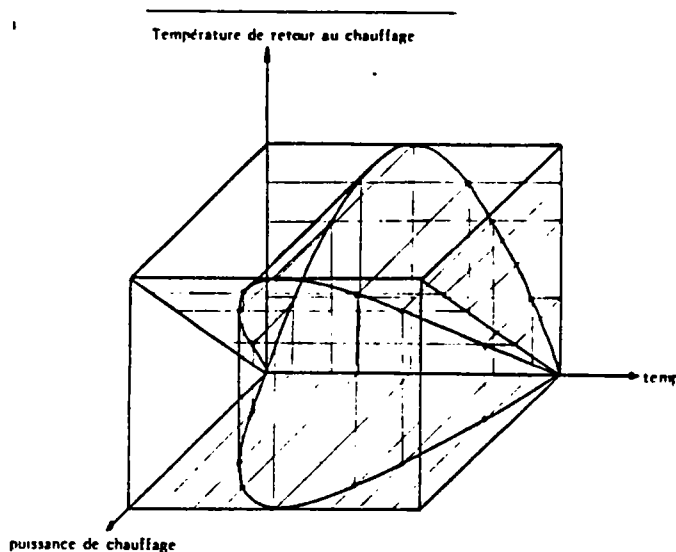
ΔT est l'écart de la température extérieure équivalente par rapport à la température intérieure de consigne (19 ° dans les logements, conformément à la réglementation, mais plus élevée dans les hôpitaux, par exemple). Une hypothèse du même type sur le fonctionnement des émetteurs de chaleur, compte tenu d'un certain rendement global, permet d'obtenir (sous réserve de la donnée d'une courbe des températures extérieures) une courbe du niveau thermique du retour des installations de chauffage.

Il est alors possible d'avoir en fonction du temps et de la température extérieure la puissance nécessaire au chauffage.

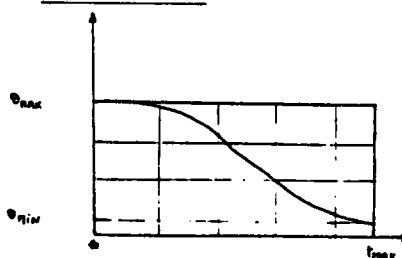
En raison de la modulation température-débit, il n'est toutefois pas immédiat d'en déduire l'évolution de l'énergie restant disponible dans le stockage.

La figure 2 donne un aperçu du domaine : puissance appelée température de retour du chauffage, en fonction du temps.

SURFACE DE DEPENDANCE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE CHAUFFAGE (figure 2)



COURBE DE RESTITUTION DU STOCKAGE
(à débit constant)



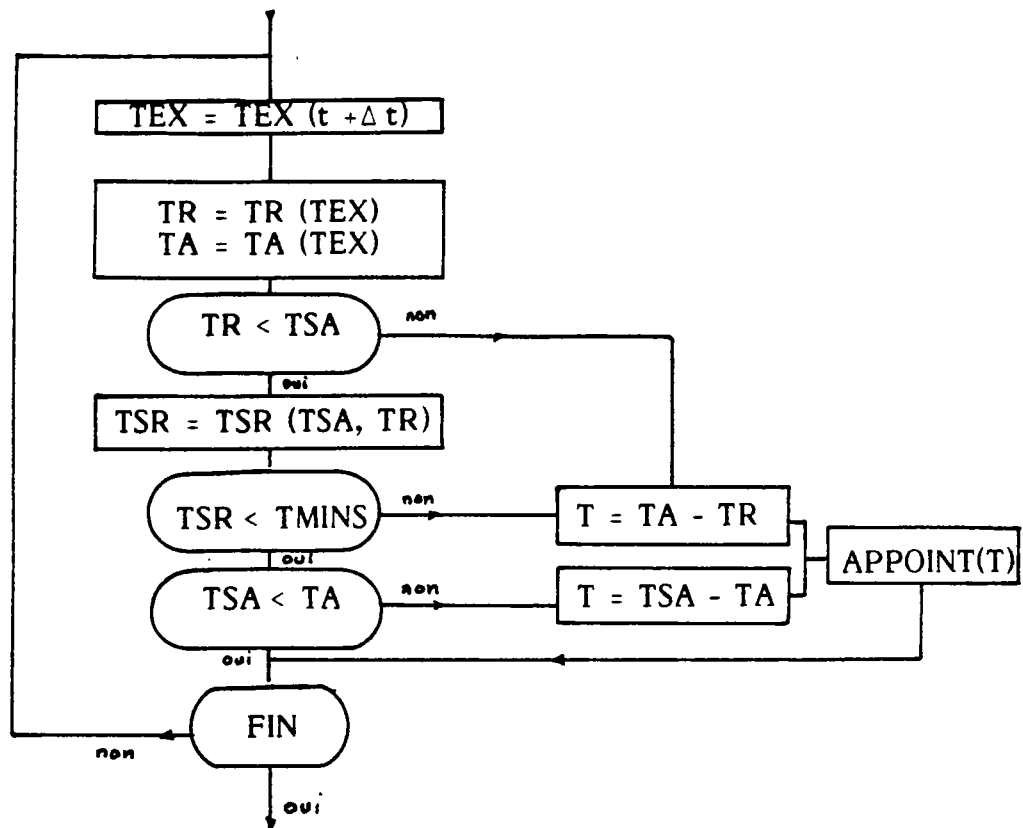
La résolution pratique du problème doit prendre en compte :

- Les données climatiques moyennes ;
- l'historique (proche et lointain) de la gestion du stockage ;
- l'exédent de disponibilité de l'effluent thermique ;
- l'appoint éventuellement nécessaire ;
- la récupération sur la production électrique le cas échéant ;
- la consommation générale d'énergie du système.

De manière sommaire, il est possible, à titre indicatif, de donner une idée symbolique de l'algorithme de calcul permettant de déterminer les paramètres au temps $t + \Delta t$ connaissant les paramètres au temps t dans l'hypothèse d'une évolution discrétisée (figure 3) en négligeant l'incidence de l'échange direct avec l'effluent thermique et la récupération sur le moteur thermique (dans l'hypothèse d'une auto-production d'électricité).

SEQUENCE DE CALCUL AU TEMPS t POUR UNE DUREE Δt $t = t + \Delta t$

FIGURE 3



- TEX : Conditions extérieures
- TR : Température de retour du chauffage
- TSA : Température de sortie du stock
- TSR : Température de retour du stock
- TMINs : Température minimum en puits froids
- TA : Température de sortie de l'appoint
- Appoint(T) : Puissance de l'appoint

4 - EVALUATION ECONOMIQUE DU SYSTEME ET CHOIX D'UN SITE.

La mise en place du modèle de simulation numérique permet d'aborder de manière théorique la rentabilité du système en permettant une évaluation des coûts de fonctionnement (coût de pompage, incidence financière due au recours à l'appoint, etc...). Les autres postes : amortissement des installations, renouvellement des matériels, personnel, achat éventuel de la chaleur, sont tout à fait classiques.

Actuellement l'IMRG a procédé à un inventaire des aquifères susceptibles de servir de cibles pour un tel type de stockage. Parallèlement une enquête a permis d'orienter le choix sur plusieurs sites d'implantation possibles. Un site paraît particulièrement favorable dans la mesure où on y trouve simultanément une UIQM sans récupération de chaleur et une forte concentration de logements chauffés par panneaux de sol.

En tenant compte des caractéristiques réelles des sites retenus, une première évaluation du coût des ouvrages est en phase d'achèvement.

POMPES A CHALEUR POUR L'EXPLOITATION GEOTHERMIQUE DE SUBSURFACE

A. Menjoz - JP. Sauty

OBJECTIFS ET MOYENS

L'exploitation géothermique du sous-sol à faible profondeur est un sujet particulièrement vaste ; elle représente un enjeu énergétique important et de très nombreuses réalisations en ont montré l'intérêt pour la fourniture des besoins de chauffage ou de climatisation.

La première caractéristique de cette ressource est sa faible température d'où le recours aux pompes à chaleur pour assurer la restitution de l'énergie prélevée à un niveau compatible avec les besoins. Ces dispositifs sont actifs, et par conséquent consomment de l'énergie. Ainsi, bien que la ressource soit quasiment gratuite, le dimensionnement, l'investissement, et le coût de fonctionnement du dispositif conditionnent pour une large part la faisabilité d'un projet.

La seconde caractéristique de cette ressource à faible profondeur est son caractère renouvelable en raison des écoulements souterrains et des apports météoriques et solaires périodiques. La pérennité de la ressource est alors liée au mode d'exploitation (énergie globale prélevée, historique de prélèvement) et à la résorption de l'impact sur l'environnement immédiat engendré par le dispositif d'extraction.

Dans certains cas particuliers, la présence d'un niveau énergétique naturel trop faible, ou une régénération thermique trop lente peut conduire à envisager l'opportunité d'un stockage estival afin de satisfaire l'adéquation ressources-besoins.

Les travaux sur ce thème ont été réalisés dans le cadre de trois thèses. Les sujets définis en 1981 et 1982, à l'initiative du BRGM (mission hydro-énergie et département Eau), ont été par la suite inclus en 1983 dans le programme général de recherches de l'IMRG. Le suivi scientifique de ces travaux a été essentiellement réalisé par le département EAU en collaboration avec l'IMRG.

RESUME DES TRAVAUX ET RESULTATS ACQUIS

- * Contribution à l'étude des possibilités d'utilisation de l'eau souterraine pompes à chaleur
(thèse de 3ème cycle - soutenance prévue en fin d'année 1983 - F. JAUDIN).

Le but de cette étude était de rassembler et compléter un certain nombre de données utilisables dans la réalisation des projets de pompes à chaleur (PAC), utilisant l'eau souterraine comme source de calories.

Après un rappel des principes de fonctionnement, des moyens de sélection et des conditions d'utilisation des PAC, l'analyse technico-économique d'une douzaine de réalisations en région Centre, nous a permis d'étudier les conditions réelles d'installation et de fonctionnement d'opérations dans leur ensemble.

Enfin, un réseau de contrôle de la température des eaux des nappes dans le Val d'Orléans a été mis en place fin 1981 et suivi durant une année.

Les performances du matériel et sa diversité, permettent actuellement de disposer d'une gamme étendue de pompes à chaleur, essentiellement pour le chauffage à basse température ($\leq 55-60^{\circ}\text{C}$).

Les bilans économiques des opérations étudiées : dix chauffages individuels, une serre, un chauffage/rafraîchissement chez un industriel ; montrent que le temps de retour des investissements, est beaucoup plus court pour les installations importantes que pour celles de faible puissance.

Seules des opérations de grosse ou de très grosse puissance pourront permettre d'envisager des investissements sous-sol permettant de résoudre, si nécessaire, les problèmes locaux d'accessibilité ou de disponibilité de la ressource en eau. Le développement des PAC de très faible puissance (comme les PAC individuelles) pourra être localement entravé par les coûts d'accès à la ressource. Par contre, les secteurs à forte densité d'ouvrages existants voient se développer rapidement les opérations PAC, dans la mesure où les ouvrages sont réutilisés pour les prélèvements et les rejets.

Le site du Val d'Orléans avait été retenu en raison d'une urbanisation croissante et des fluctuations prévisibles de la température, en conséquence des pertes de la Loire. Il s'agissait d'étudier les influences conjuguées des crues de la Loire et des variations normales saisonnières dans des ouvrages existants captant soit la nappe alluviale, soit la nappe des calcaires lacustres.

Pour des ouvrages de très faible profondeur (< 10 m) les fluctuations annuelles naturelles de température restent généralement inférieures à 6°C ; les minimums observés, supérieurs à 8°C , permettent d'envisager l'exploitation par PAC en circuit ouvert sur l'ensemble de la zone d'étude. Les ouvrages plus profonds (> 20 m) sont caractérisés par une très bonne stabilité de la température au long de l'année (entre 11° et 12°C), avec cependant quelques exceptions à proximité des drains karstiques.

* Résorption des perturbations thermiques consécutives aux rejets des pompes à chaleur (thèse 3ème cycle - soutenance en fin d'année 1983 - M. GRIMA)

. lère partie :

Cette recherche a été menée dans le cadre de l'étude générale d'impact des rejets d'eau froide en aquifère consécutifs à l'exploitation thermique des nappes pour le chauffage par pompes à chaleur (BRGM). L'importance fondamentale des échanges thermiques avec les éponges sur l'étendue de la zone perturbée a été montrée par ailleurs sur des modèles prenant en compte les seuls échanges par conduction. Les travaux évoqués ici se sont attachés à l'évaluation de l'effet complémentaire des transferts convectifs à travers une éponge supérieure non saturée en eau, entre la surface libre d'une nappe phréatique et le sol.

On a simulé numériquement, à l'aide d'un modèle monodimensionnel, les transferts hydriques et thermiques couplés, en prenant en compte les flux d'échanges sol-atmosphère à partir de données microclimatiques. Le programme de calcul, antérieurement mis au point à l'Institut de Mécanique de Grenoble, a été appliqué à l'échelle journalière et semi-annuelle, pour trois types de sols dont les caractéristiques hydriques et thermiques avaient été préalablement déterminées en laboratoire : limon sableux, sables de Grenoble, Yolo lighy clay.

Les résultats de ces simulations ont ensuite été comparés à ceux d'un modèle simplifié purement conductif et homogène avec imposition de la température au sol. Ce dernier modèle s'est avéré d'une précision suffisante pour la simulation des transferts sur une longue période (plusieurs mois). Dans les conditions de l'étude (température de nappe stable, fluctuations thermiques au sol de 20°C), il est raisonnable de découpler les phénomènes hydriques et thermiques ; en effet :

- les transferts thermiques par convection (chaleur entraînée par l'eau en mouvement) dans l'éponte supérieuresont négligeables devant les échanges conductifs ;
- par contre, la teneur en eau influe de façon non négligeable sur les paramètres thermiques (conductivité et diffusivité), mais la prise en compte de paramètres moyens sur le profil, durant la période étudiée, est suffisante ;
- la condition à la limite du sol peut être représentée par une température imposée variant sinusoïdalement au cours de l'année indépendamment de la température de la nappe, si celle-ci se situe à plus d'un mètre de profondeur ; pour des simulations sur plusieurs années, l'affichage d'une température moyenne constante suffira.

. 2ème partie :

Le développement des pompes à chaleur sur eau de nappe pour le chauffage pose le problème de la conservation de la ressource en eau. Celui-ci est résolu si les eaux sont réinjectées dans leur aquifère d'origine, après extraction de leurs calories ; en contrepartie, ces eaux créent, autour du forage d'injection, une zone froide d'extension croissante dans laquelle la faisabilité technique d'autres installations du même type peut être remise en cause. Ces installations concernent généralement des aquifères peu profonds, siège d'un écoulement non négligeable (quelques dizaines à quelques centaines de mètres par an), susceptible d'entraîner par advection une partie de l'eau froide injectée. Nous avons étudié en 1982 l'évolution de la zone d'aquifère refroidie (extension et niveau thermique), dans des hypothèses très schématiques : écoulement uniforme peu perturbé ou prise en compte de la proximité du sol, mais en régime thermique stabilisé (AUSSEUR, SAUTY, Colloque Castany, 1982).

Le travail de M. GRIMA a consisté à étudier l'influence des différents facteurs physiques négligés dans l'étude sommaire de l'année antérieure, et notamment d'exploiter les conclusions de son travail sur les transferts thermiques à travers une éponte supérieure non saturée.

Cette étude a été partiellement réalisée à l'aide de modèles numériques ; dans bien des cas, des solutions analytiques approchées ont pu être développées, vérifiées puis utilisées pour la simulation rapide de nombreux cas en fonction des différents paramètres. Elles permettent notamment d'évaluer l'erreur induite par l'utilisation d'une formulation approchée.

Les différents points suivants ont été abordés :

- modélisation : équations aux paramètres physiques, choix de variables réduites, équations réduites, mise au point d'un modèle numérique, validation du modèle,
- influence de la proximité du sol en régime transitoire,
- influence du gradient thermique vertical au sein de l'aquifère,
- influence de la conduction thermique horizontale dans les épontes,
- influence de la désaturation de l'éponte supérieure,
- influence d'une température de surface différente de la température naturelle de l'aquifère,
- influence de la dispersion cinématique,
- influence de la non-uniformité des écoulements dans l'aval immédiat du puits de rejet.

* Système à échangeur vertical CORAIL ; étude générale et application au projet de Lannion (thèse de Docteur-Ingénieur - soutenance prévue en fin d'année 1984 - M. JAY)

Le projet présenté répond à une recherche d'économie d'énergie et contribue à l'étude de l'utilisation des pompes à chaleur pour l'exploitation thermique des sols de subsurface, hors aquifère.

Le phénomène physique mis en jeu (Conduction Radiale en milieu Illimité) justifie l'appellation de CORAIL. Ce dispositif composé d'une installation souterraine et d'une installation de surface constitue dans son ensemble une pompe à chaleur sol/eau. L'installation souterraine (forage à double paroi avec circulation d'eau en circuit fermé) permet d'extraire des calories du sous-sol, l'installation de surface (pompe à chaleur raccordée au forage) permet de les utiliser pour chauffer des locaux. Un tel procédé très facile à mettre en oeuvre dans les terrains durs peu perméables, grâce à la technique du marteau fond-de-trou, permettra de développer les possibilités d'installation de pompe à chaleur dans ces terrains où les débits rencontrés sont généralement insuffisants pour installer une pompe à chaleur sur nappe.

Le fonctionnement de la pompe à chaleur est lié à la température de la source froide qui dans ce dispositif diminue en cours d'exploitation.

Les Suédois ont beaucoup utilisé un dispositif de même principe que CORAIL mais qui en diffère par le nombre de forages et par la mise en oeuvre de phases de stockage et de déstockage.

Les travaux de recherche ont porté sur :

- la mise en oeuvre du modèle numérique et son application au projet de Lannion,
- l'étude de faisabilité technique et économique du projet de Lannion,
- l'estimation du coût de différentes variantes du projet.

. Approche analytique :

Il existe une solution analytique, utilisée en géothermie, permettant de calculer les pertes thermiques entre le niveau productif et la tête de forage en fonction des caractéristiques physiques de celui-ci. Programmée sur micro-ordinateur, elle a permis de suivre l'évolution de la température de l'eau en sortie de forage au cours du temps (les pertes thermiques au cours de la remontée étant supposées négligeables). Mais elle ne permet pas de suivre l'évolution de la température et des échanges thermiques dans le sous-sol ce qui rend nécessaire la modélisation numérique.

. Modèle numérique :

Ce modèle numérique résout l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques par la méthode des différences finies en régime transitoire. Prenant en compte les paramètres : conditions d'injection, géométrie, propriétés thermiques et puissance prélevée, il a permis d'en montrer l'influence sur la température de l'eau dans le forage et en sortie. La performance du système croît avec l'augmentation du diamètre, la profondeur et la conductivité thermique du terrain.

. Etude de faisabilité du prototype de Lannion :

Le site de l'école maternelle du Rusquet a été retenu. Les besoins en chauffage de l'école ont été évalués avec les services techniques de la municipalité, qui ont également apporté leur aide technique lors de la réalisation des forages de reconnaissance.

L'étude a consisté à analyser les différents points suivants :

- reconnaissance géologique de surface,
- réalisation de deux forages de reconnaissance dans le granite,
- mesure des conductivités thermiques sur échantillons,
- estimation des besoins énergétiques,
- dimensionnement de l'installation (3 variantes),
- étude économique et coût des 3 solutions.

. Objectifs prévus pour l'année 1984 :

L'objectif final est de réaliser un modèle technico-économique de l'installation globale (forage et pompe à chaleur) afin d'optimiser son fonctionnement et d'évaluer les économies d'énergie envisageables.

Les étapes prévues jusqu'à cet objectif sont :

- d'abord réalisation d'un modèle de surface, qui prendra en compte les caractéristiques de la pompe à chaleur, et les données météorologiques afin de prévoir le mode de fonctionnement de la PAC ;
- ensuite couplage du modèle de surface avec la formule analytique du dispositif CORAIL, afin d'optimiser le fonctionnement de l'installation globale, en fonction de la météorologie et des besoins ;

- puis couplage du modèle de surface avec la loi de la température dans un dispositif de stockage pour optimiser le fonctionnement de ce type d'installation ;

- étude du fonctionnement d'une installation de stockage avec capteurs solaires ;

- enfin prendre en compte les coûts afin de chiffrer les différents projets et de prévoir les économies réalisables.

Toute la programmation sera réalisée sur micro-ordinateur, afin de diminuer les coûts de calculs, et d'élargir le champ des utilisateurs potentiels du modèle.

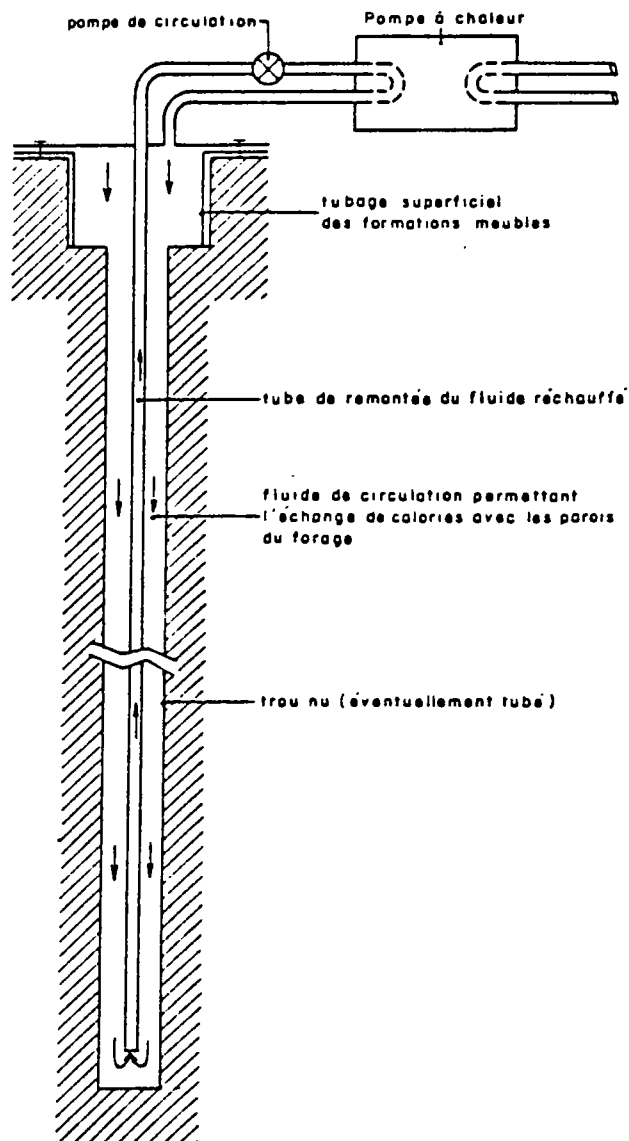


FIGURE 1 - Principe du procédé CORAIL

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.

B.P. 6009

45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.

27, Rue Louis Vicat

75015 PARIS

- PROBLEMES POSES PAR L'EXPLOITATION DU TRIAS -

- Document provisoire -

CONFIDENTIEL

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

PROBLEMES LIES A LA REINJECTION AU TRIAS

A. Boisdet

L'OBJECTIF DU PROGRAMME EST DE PERMETTRE L'EXPLOITATION RENTABLE

D'UN DES PRINCIPAUX GISEMENTS GEOTHERMIQUES FRANCAIS :

L'enjeu énergétique en France

Le réservoir du Trias est plus étendu que celui du Dogger :
32 500 km² contre 17 700 km².

Globalement si les températures sont comparables, la productivité du Trias est moins bonne que celle du Dogger.

Les difficultés rencontrées pour l'exploitation du Trias

Les premières tentatives d'exploitation se sont soldées par des échecs : à cause de la productivité pour Cergy-Pontoise ou de l'injection pour Melleray puis Achères. Dans le cas de Melleray et Achères, alors que la productivité s'est révélée satisfaisante, l'injectivité est faible (moins du quart du débit produit) ce qui rend impossible l'exploitation classique en doublet. Ceci a entraîné le repli au Dogger à Achères et le rejet provisoire en Loire à Melleray.

Perspectives d'utilisation du réservoir

La découverte des causes des difficultés d'injection revêt un intérêt énergétique fondamental. Toutefois les solutions à mettre en oeuvre doivent restées compatibles avec les données économiques de la géothermie ; ceci peut conduire à rejeter les méthodes utilisées actuellement dans l'industrie pétrolière si elles se révélaient d'un coût de revient prohibitif (ultrafiltration, additifs, fracturation hydraulique, etc...)

MOYENS MIS EN OEUVRE :

CONTEXTE GENERAL :

Les hommes

Afin de pouvoir aborder les aspects du problèmes un groupe pluridisciplinaire a été structuré au sein de l'I.R.G. Il représente les compétences suivantes :

- géologie
- géochimie
- modèles hydrauliques et thermiques
- thermique
- corrosion

Les collaborations extérieures

- GDF pour ce qui concerne les ouvrages de stockage de gaz forés au Trias,
- Le laboratoire de bactériologie de l'Université de Marseille (Concours PIRSEM)
- L'université d'Orléans et de nombreux industriels en ce qui concerne la corrosion,
- par ailleurs les organismes suivant sont consultés : IFP, géotherma, SNEAP, Dowell-Schlumberger

LES MOYENS SCIENTIFIQUES :

- A - Instrumentations sur le site de Melleray,
- B - Etudes géochimiques
- C - Essais de laboratoire
- D - Géologie
- E - Bactériologie et corrosion

CHRONOGRAMME GENERAL SOMMAIRE

nature de l'objectif	Déroulement annuel		
	1983	1984	1985
I Réinjection au TRIAS	 identification des causes 	 méth. de protection 	 Certification des méthodes de protection
II Corrosion	 mai Identification des phénomènes 	 	 Recommandations et certification

DETAIL DES MOYENS MIS EN OEUVRE :

MELLERAY

Les moyens

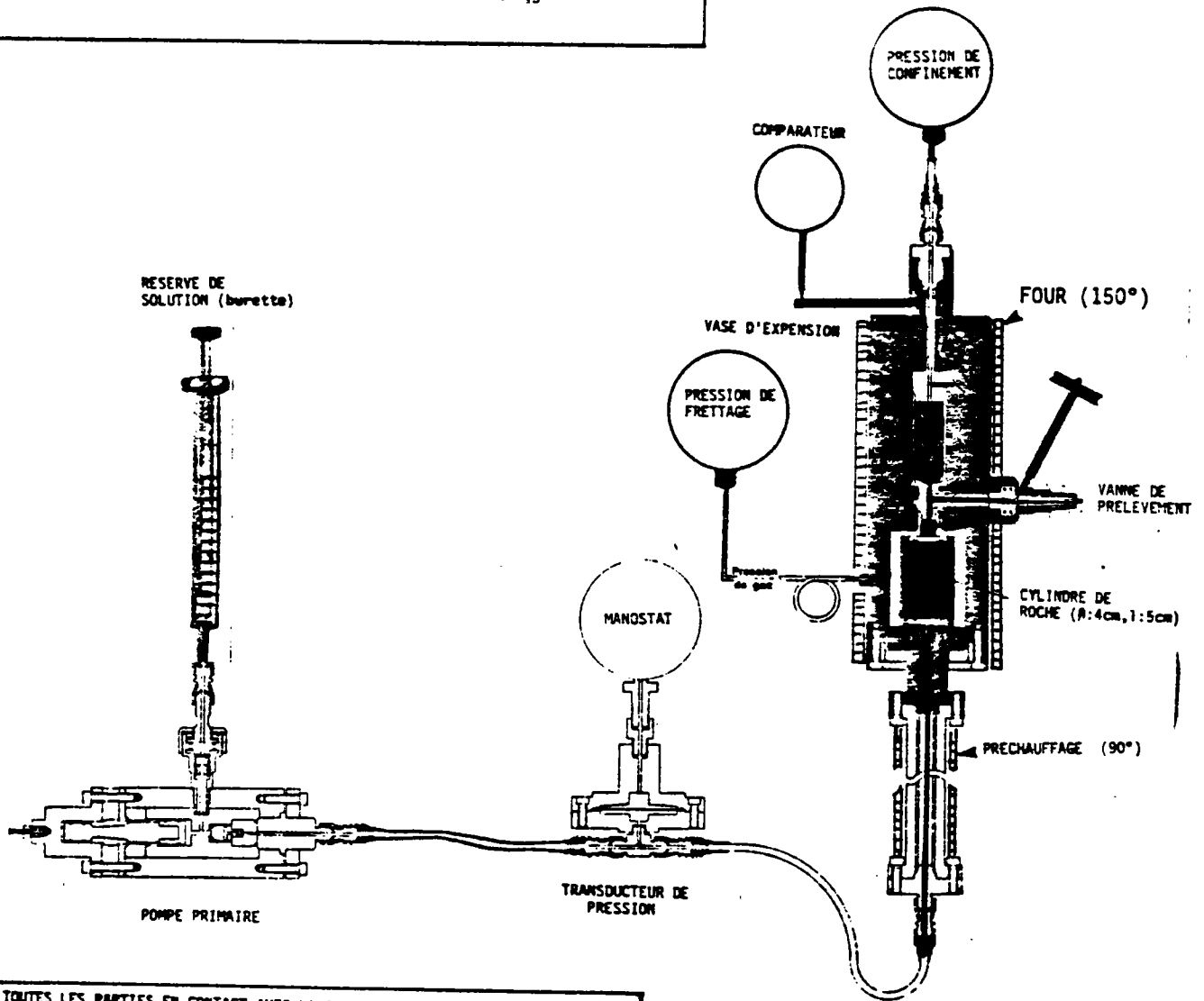
- a) Des moyens de mesure importants ont été prévus et sont en cours de mise en place sur le site de Melleray. Il s'agit :
- de contrôler les paramètres physiques de l'écoulement : débit, températures, pressions.
 - de procéder à une analyse fine du fluide géothermal portant sur les particules transportées (filtration poussée sur une dérivation) et sur l'agressivité des eaux par des mesures de pH et d'Eh en divers points (voir fig. 1).
- L'ensemble des sondes et des commandes et des différents matériels sera géré par une centrale de commande et d'acquisition de données.
- b) Une unité pilote de corrosion sera également installée sur le site afin de tester les matériaux utilisés couramment en géothermie, à l'attaque des eaux du Trias en présence, ou non, de bactéries.
- c) Des essais sont prévus sur le puits de réinjection :
- prélèvement de fond de puits,
 - mise en production (azote lift si nécessaire) avec historique des filtrations.

Etat actuel du programme

- a) les paramètres physiques de l'écoulement ont fait l'objet d'une évaluation précise : pression, température, vitesse du fluide dans le réservoir et dans les réseaux, dégazage.
- b) Les différents matériels concernant les mesures des paramètres physiques et chimiques, la centrale de commande et d'acquisition de données ont été commandés ainsi que les matériels annexes (pompes volumétriques, filtres, vannes, etc...) L'unité pilote de corrosion après la phase de conception en est à sa phase de réalisation.
- c) Le coût des opérations de remise en production du puits d'injection a été évalué.
- d) La maîtrise de l'ouvrage à la suite de l'examen de la situation juridique et financière fait l'objet d'étude de la part des services juridiques du BRGM.

SCHEMA DE PERCOLATION AU TRAVERS D'UN GRANITE A 150°.

Perméabilité de l'ordre 10^{-5} milli-Darcy



TOUTES LES PARTIES EN CONTACT AVEC LA SOLUTION SONT EN TEFLON OU EN TITANE

e) travaux de percolation (voir fig. 2)

La simulation de l'écoulement sur des carottes du réservoir de Melleray a déjà permis de mettre en évidence, pour un horizon très peu perméable, un phénomène de réduction du débit passant à pression constante.

Pour les carottes plus perméables, le matériel utilisé ne permet pas de simuler (débits trop faibles) les conditions de fond de puits. Aucun matériel de percolation actuel n'est d'ailleurs spécifiquement adapté aux conditions de la géothermie. Ce sont des outils adaptés à la recherche pétrolière et qui ne peuvent être vraiment utiles en géothermie que pour tester des carottes peu perméables ou simuler le comportement de zones relativement éloignées de l'axe du puits.

Un percolateur adapté aux conditions de la géothermie et permettant de simuler les conditions de fond de puits est actuellement à l'étude à l'I.M.R.G.

Pour les six mois à venir :

- Installation de l'unité de prélèvement sur site.
- Réglage des différents appareils et mis au point des logiciels de commande et d'acquisition de données.
- Travaux sur GMY2.
- Filtration et installation du pilote de corrosion.
- Comptage de particules.

BACTERIES ET CORROSION (voir figure 3)

Les moyens :

- a) Le pilote de corrosion vise à tester des échantillons métalliques soumis à l'attaque de l'eau géothermale.

Pour ce faire trois enceintes seront mises en place, la première ne contenant qu'un seul métal dit métal de référence avec différents états de surface, le second comportera l'ensemble des échantillons et, contrairement au troisième, ceux-ci seront soumis à l'action des bactéries. Les différents échantillons sont disposés de manière à tester les différents types de corrosion. Les échantillons seront prélevés simultanément dans les trois enceintes et analysés. Au terme de cette expérimentation, des recommandations seront publiées sur le choix des matériaux pour les opérations de géothermie.

- b) Les problèmes bactériens. Divers ensemencements ont été effectués afin d'analyser la nature et les conditions de développements des différentes souches autochtones ou allochtones. Les travaux sont conduits par le laboratoire de M. BIANCHI à Marseille.

Etat actuel du programme et premiers résultats :

- a) Corrosion :

L'architecture et la composition chimique des enceintes du pilote ont été définies ainsi que le choix et la répartition des échantillons métalliques.

Dans la mesure où ce programme est relié directement à l'influence de la corrosion sur les ouvrages existants une première inspection par vidéo-caméra a été effectuée sur un forage en région parisienne.

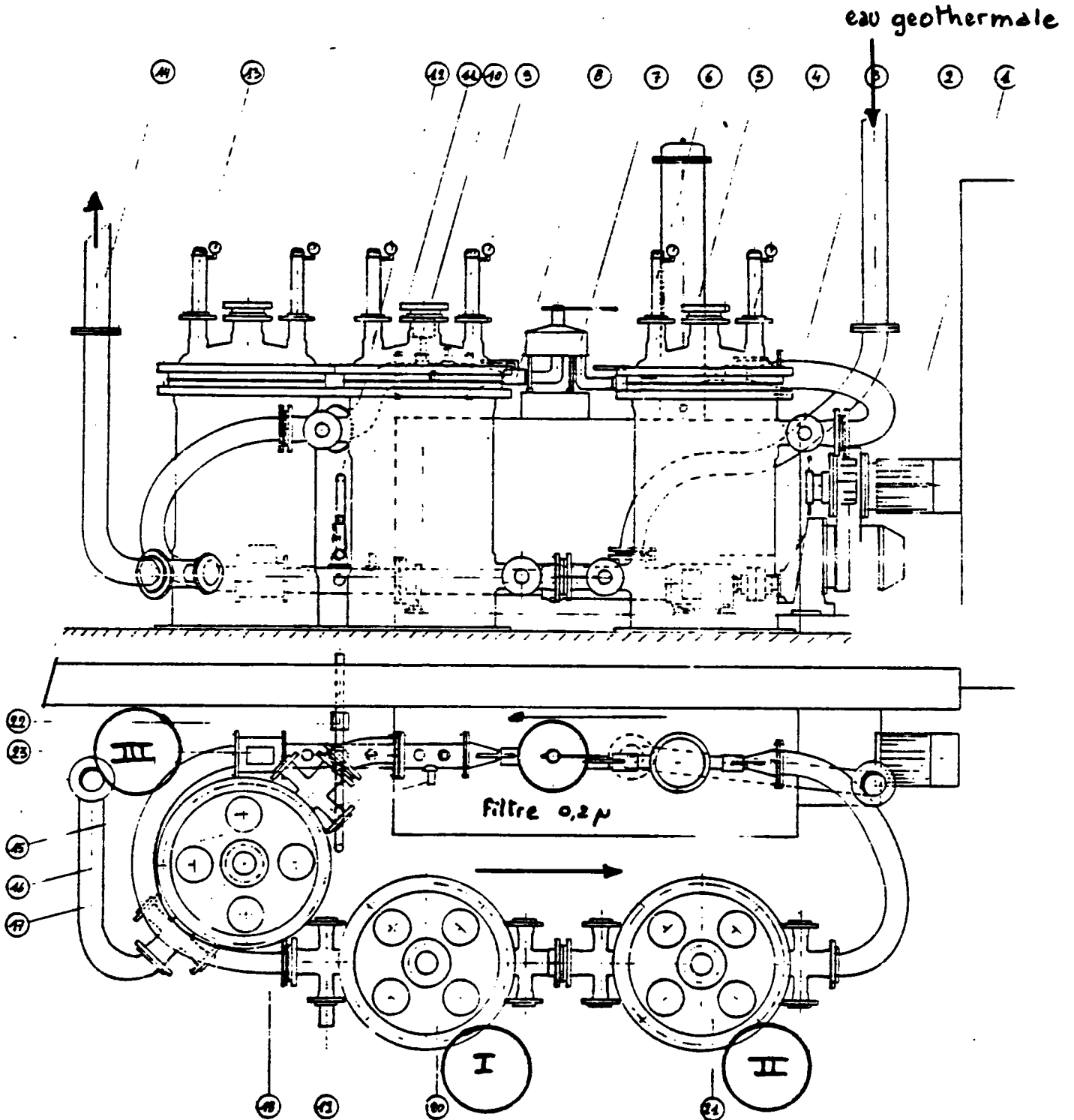
- b) Bactéries :

Les premières investigations ont permis d'accréditer la thèse d'un développement important de certaines souches bactériennes à une température comprise entre 30 et 50°C. Ces conditions existent au puits de réinjection, l'influence du rôle des bactéries dans les problèmes de réinjection actuelle, ou à venir, au Trias est à évaluer de manière précise ainsi que les moyens à mettre en oeuvre pour la combattre.

Réalisations prévisibles pour les six mois à venir :

- Outre le montage du pilote de corrosion mentionnés par ailleurs, il est prévu de réaliser une autre visite de forage par vidéo-caméra.
- La cinétique du développement des souches bactériennes et les moyens de la prévenir, ou de la combattre seront analysés et testés. Ce travail fait l'objet d'une thèse au laboratoire de M. BIANCHI à Marseille (ce thème d'étude est aidé également par le PIRSEM).

PILOTE DE CORROSION

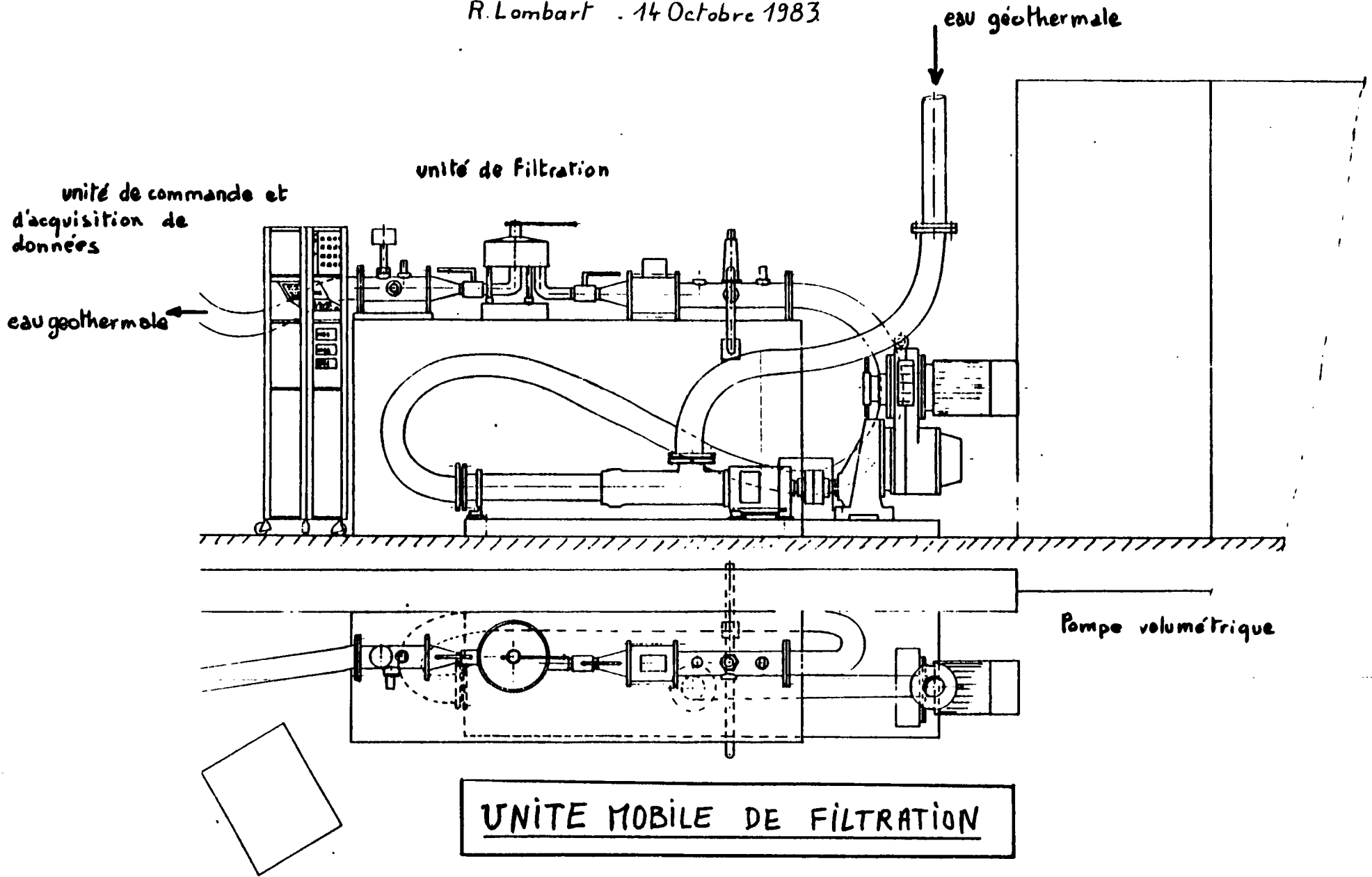


Enceintes

- I remoin = 1 seul métal
- II tous échantillons + bactéries
- III " sans bactéries

Implantation

R. Lombart . 14 Octobre 1983



GEOCHIMIE DES FLUIDES ET ETUDE DES PARTICULES

C. Fouillac

INTRODUCTION

Les particules extraites de la formation au niveau du puits de production, ou générées dans le fluides lors de l'exploitation peuvent constituer une eau de colmatage importante. Deux actions ont été mises sur pieds afin de mesurer l'importance de ces phénomènes.

RESULTATS ACQUIS EN 1983

Etude des particules présentes dans le fluide au niveau des puits.

Un protocole d'analyse visant à la détection d'indentification et aux essais de la minéralisation a été mis en oeuvre. Un premier essai a été réalisé sur le forage d'Achères 1 au Trias. Les résultats bruts et la méthodologie sont présentés dans un document séparé figurant au rapport annuel 1983 de l'IMRG.

En résumé on peut dire que :

- les particules arrachées à la formation (argiles, quartz) sont extrêmement peu nombreuses, environ 1 %. Cas rares.
- les particules sont assez grasses (jusqu'à 20 μ) ;
- La très grande majorité, supérieure à 95 % des particules est constituée par des colloïdes de très petite taille 0.2 μ de composition quasiment constante ($\frac{Fe}{Si} \approx 5$).
Le fer et la Silice dominent fortement tous les autres éléments qui font figure de mineurs (Ca, Al, K).

Les mêmes analyses sont attendue de réalisation sur le site de Melleray. Dans ce cas un recoupement des résultats d'Achères a été obtenu par comptage direct de particules suivant les techniques de diffraction de lumière laser (appareillage Coultronics). Cette méthodologie permet une mesure des rayons moyens et une numération pour chaque gamme de taille. La encore, la majorité (≈ 99 %) des particules se trouve être de taille infra-micronique ; Les autres tailles constituant l'exception.

A ce stade de l'étude, on peut avancer l'idée que les fluides du trias très riches en fer réduit (Fe^{2+} et assez pauvre en silice contiennent à l'équilibre une proportion notable de ces deux éléments sous forme colloïdale :

	Fe^{2+}	Si	
Achères	30	16	Teneur en mg/l
Melleray	35	35	

La boucle d'exploitation ne ferait alors que provoquer la coalescence

La boucle d'exploitation ne ferait alors que provoquer la coalescence de ces colloïdes. La formation micro-poreuse argilo-gréseuse pourraient alors jouer le même rôle que les filtres cellulosiques dans les opérations de prélèvement.

Les quantités ainsi produites au débit classique des puits de production pourraient atteindre 5/6 Kg/jour, bien que ces valeurs soient entachées d'une grande incertitude (\approx 50 %). Ces résultats rejoignent ceux bien connus, obtenus sur les saumures géothermales de haute enthalpie, qui développent elles aussi des colloïdes FeSi dès l'émergence ; dans ce cas ils sont simplement beaucoup plus riches en silice ce qui est normal vu les températures plus élevées de ces saumures. Dans ces conditions on devrait envisager des techniques de traitement de surface pour supprimer ces effets si leur généralité était prouvée. On peut estimer que les fluides du Trias présentent cette particularité (colloïdes) contrairement à ceux du dogger à cause des teneurs très importantes en fer dans rencontrées dans les eaux triasiques. Les teneurs en fer et fluide du dogger sont toujours maintenues à des niveaux très bas par la présence de soufre réduit.

Etude thermodynamique des possibilités de dépôts dans la boucle

L'éventualité des dépôts de minéraux néo-formés a été testée sur ordinateur. Les calculs d'équilibre thermodynamique ont été menés essentiellement sur le site de Meleray. Deux types de programmes ont été utilisés (Type "WATEQ" et type "MASS TRANSFER"). Ces études ont identifiées des minéraux susceptibles de se former dans la boucle d'exploitation : sidérite (FeCO_3) et Calcédoine principalement. Les conditions de simulation faisaient indépendamment les paramètres directeurs du système : Température, pH). On a également effectué des simulations où la variation de deux paramètres est liée, la chute de température due à l'exploitation provoquant une variation de pH par modification des constantes d'équilibre acido-basiques. Dans un premier temps, les variations de pH ont été simulées à composition chimique globale constante et les évolutions seraient amplifiées si les conditions d'exploitation permettent un dégazage partiel ; ceci augmenterait le pH du fluide résiduel par perte de CO_2 . L'étude de A. MENJOZ (ce rapport section 4) montre qu'une telle éventualité doit être prise en considération. En résumé quels que soient les modes de variation de t, pH, imposées a priori dans les simulations les deux seuls numéros susceptibles de précipiter sont la Sidérite et la Calcédoine. La solubilité du premier minéral est surtout sensible aux variations de pH alors que la solubilité de la Calcédoine ne dépend que de la température. Il serait très imprudent de conclure dès à présent que ces minéraux précipitent effectivement dans la boucle d'exploitation. Ces études ne déterminent qu'à l'état thermodynamique qui rend possible la précipitation. Pour que le phénomène s'accomplisse réellement, il faut que les vitesses de nucléation soient grandes devant les vitesses de variations des degrés de saturations des minéraux. Une telle situation n'est absolument pas certaine.

Pour tester la réalité de ce phénomène de dépôt nous avons conçu et monté une cellule de mesures électro-chimiques permettant en continu

l'évolution du fluide à l'abri de l'atmosphère lors d'une baisse de température. La température, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction peuvent être mesurés en continu, on peut également procéder à des prélèvements discontinus de fluide pour contrôler l'évolution des concentrations en fer et silice. Par suite d'accès au site de Melleray un premier type de cellule a été testée sur un petit peu d'eau assez semblable à celui de Melleray. Le matériel est maintenant en attente d'opération.

En admettant que les situations prédites thermodynamiquement se concrétisent, on aurait effectivement des dépôts de quantité importante de solide (10 à 20 Kg/jour) ayant eux aussi une action néfaste sur la perméabilité de la formation. Pour prévenir ces phénomènes il faudrait la aussi faire appel à des méthodes de traitement de fluides en surface.

GEOLOGIE

J.P. Cautru

La contribution de la géologie à l'étude des problèmes liés aux réservoirs argilo-gréseux du Trias se situe à plusieurs échelles depuis l'étude régionale et locale avec les informations recueillies en Sologne et à Melleray jusqu'à l'étude très ponctuelle du réseau poreux du grès au microscope.

ETUDE REGIONALE

Elle est au stade de la collecte de données et d'échantillons auprès de la Direction des Hydrocarbures (Service de conservation des gisements) et auprès de Gaz de France pour les structures de Contres et Soings en Sologne. Les éléments recueillis, en particulier le travail de Y. GUERRINI(*) permettent de se faire une idée de la complexité d'un réservoir dû à une sédimentation fluviale et montrant donc une disposition en lentilles des grès et des argiles.

ETUDE LOCALE - MELLERAY

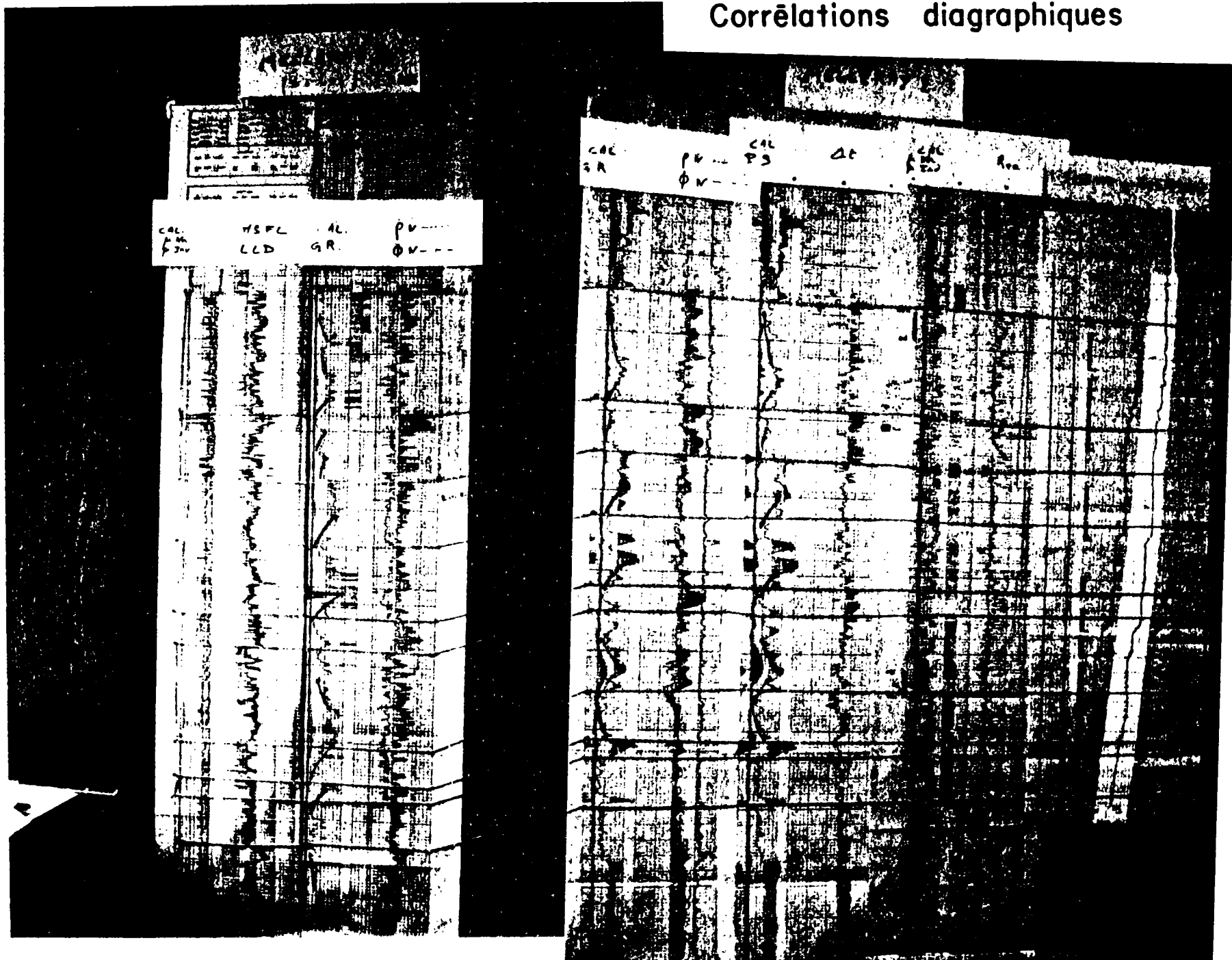
A Melleray, nous avons repris les diagraphies différées des deux sondages GMy1 et 2 et nous proposons provisoirement les corrélations de la figure ci-jointe. Il apparaît malgré la distorsion due à l'obliquité de GMy2 que les ensembles se correspondent bien d'un sondage à l'autre de même que les principaux bancs de dolomie de grès et d'argile jusqu'à des dimensions pluri-métriques. Il semble également, mais ici les recherches sont en cours, que les évolutions verticales des séries en particulier les évolutions de l'activité Gamma Ray que l'on peut assimiler à l'argilosité des séquences se font dans le même sens entre GMy1 et 2.

A Melleray 1 le toit du Trias est à - 1341 NGF (contre -1320 à GMy 2) et le socle à - 1521 NGF soit donc une épaisseur de 180 m. Entre deux repères diagraphiques de bonne qualité, là où nous mesurons 162 m à GMy 1, nous avons 153 m à GMy 2 ; le Trias montre donc une épaisseur très comparable entre les deux puits. De plus, il ne nous semble pas qu'à GMy 2 le socle ait été vraiment atteint et les déblais de roches cristallophylliennes remontés seraient plutôt des débris de galets remaniés à sa proximité immédiate.

Cette étude des diagraphies n'est pas encore terminée. Elle s'accompagne d'une reprise des déblais en cours à SGN/GEO et dont on trouvera ci-après les premiers résultats sous forme d'un tableau d'abondance relative des différents faciès. (tableau 1)

(*) GUERRINI Y., 1981 - Structure de Soings en Sologne. Synthèse des données géologiques.

Corrélations diagraphiques



Nous replacerons ainsi les niveaux aquifères dans leur contexte géologique et de leur évolution entre GMy 1 et 2 pourrait naître une idée directrice vers les forages voisins de Sennely, Rebréchien et Chémery - Contres - Soings en Sologne.

ETUDE PETROGRAPHIQUE

Elle a donné lieu à la conception et à la mise au point d'un tableau de présentation de résultats qui nous semble plus "visuel" et devant permettre des comparaisons plus faciles des échantillons entre eux que les descriptions successives habituelles. 793 2

Les diagnoses classiques ne sont pas négligées et abandonnées pour autant car elles sont irremplaçables par les détails qu'elles enregistrent et les raffinements qu'elles permettent en complément d'un tableau forcément schématique.

Les premières descriptions de lames minces effectuées par Ch. ROPELIN, SGN/GEO, sont présentées ci-joint sous cette nouvelle forme : il s'agit d'un grès fin peu poreux prélevé dans la carotte K2 de Melleray 1 à 1562,8 m de profondeur. M1 est le témoin avant percolation. M2B est aillé dans le plot après percolation et a été imprégné à 100 bars de résine colorée ; M3E est pris également dans le plot percolé mais imprégné de résine seulement par capillarité.

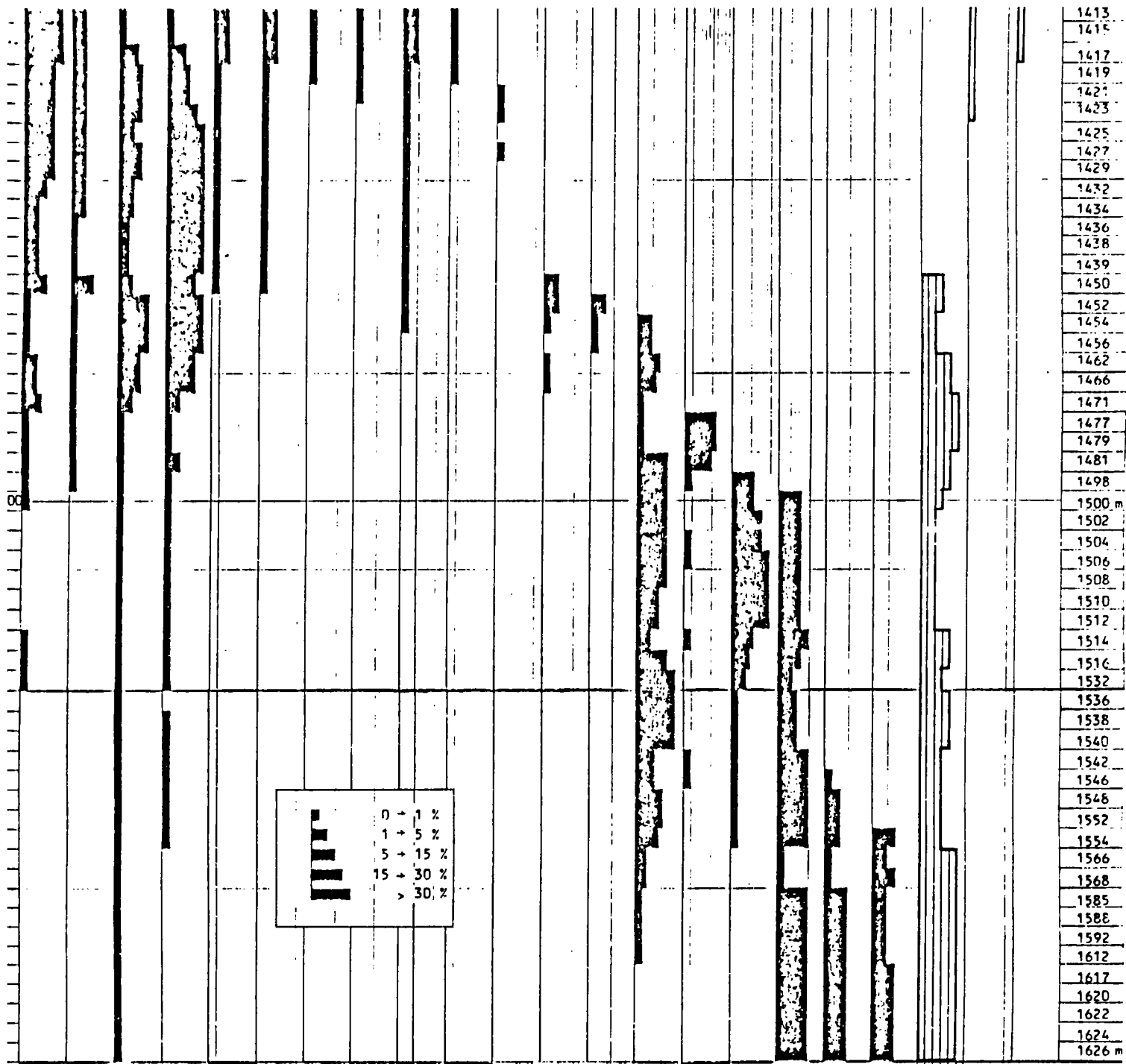
Il n'apparaît au premier coup d'oeil aucune différence dans les différentes lames, ni dans les éléments figurés ni dans le ciment. Seulement dans M3E la porosité globale serait un peu plus élevée ; et les quartz sont intacts alors que dans M2B il y apparaît des fractures qui pourraient donc être dues (ou révélées) par l'imprégnation sous pression à la résine.

Dans M2B également (mais non dans M3E) des enduits ferruginisés sont notés en paroi de pores. Ces ferruginisations ont été remarquées à l'oeil nu sur le plot après percolation.

POURSUITE DES ETUDES

Les travaux en cours aux différentes échelles (sur l'aquifère argilo-gréseux au Trias seront poursuivis avec :

- La recherche de corrélation régionale autour des forages de Melleray, Sennely, Soings en Sologne ;
- L'affinement de l'étude des diagraphies différées de Melleray ;
- La mise en forme du log géologique de Melleray 1 et 2 avec les corrélations possible d'un sondage à l'autre ;
- Le suivi pétrographique des essais de percolation et éventuellement leur orientation en fonction des résultats soit vers des matériaux de même type pour confirmation, soit vers des grès différents pour conforter le raisonnement par des témoignages a contrario.



- 1413
- 1415
- 1417
- 1419
- 1421
- 1423
- 1425
- 1427
- 1429
- 1432
- 1434
- 1436
- 1438
- 1439
- 1450
- 1452
- 1454
- 1456
- 1462
- 1466
- 1471
- 1477
- 1479
- 1481
- 1498
- 1500 m
- 1502
- 1504
- 1506
- 1508
- 1510
- 1512
- 1514
- 1516
- 1532
- 1536
- 1538
- 1540
- 1542
- 1546
- 1548
- 1552
- 1554
- 1566
- 1568
- 1585
- 1588
- 1592
- 1612
- 1617
- 1620
- 1622
- 1624
- 1626 m

0 - 1 %
 1 - 5 %
 5 - 15 %
 15 - 30 %
 > 30 %

Grès fin clair calc. quartz. dol. beige clair quartz déchaussés
 Argilite lie de vin grès blanc très por. grès fin à ciment carbonaté Argilite silteuse lie de vin
 Argilite vert-clair grainstone bioclast. calc. dolo. cristal. Grès noirâtre compact
 Argilite verdâtre grainstone spathique Argilite vert-claire à quartz grès calc. compact gravelles déchaussés
 Argilite grise noire à bioclastes grès fin gris sombre grainstone à gravelles grises grès fin poreux, lie de vin, feldspathique bioclastes déchaussés

C. ROBELIN

RESULTATS D'ANALYSE DES CUTTINGS A LA LOUPE BINOCULAIRE
 SONDAGE MELLERAY 1 BIS (FMY 1bis)

CIRCUIT GEOTHERMIQUE ET COMPORTEMENT DU RESERVOIR EN INJECTION

A. Menjot

OBJECTIFS ET MOYENS

Le but des travaux de modélisation est de préciser les paramètres de l'écoulement du fluide dans le réservoir et le circuit géothermique ; soit principalement la distribution des variables pression, température, vitesse, en intégrant divers phénomènes perturbateurs d'ordre physico-chimique ou mécanique déduits des études expérimentales.

Les premiers résultats recherchés concernent :

. La localisation des zones critiques où les conditions thermodynamiques peuvent être favorables à l'apparition des phénomènes perturbateurs (réactions chimiques, dégazage, génération d'agents colmatants...),

. L'estimation des temps de séjour en relation avec la cinétique de certaines réactions,

. L'estimation des effets du déplacement par le fluide d'agents colmatants dans la matrice poreuse du réservoir (examen des phénomènes mis en évidence par essais de percolations et conséquences lors de l'exploitation du réservoir en injection),

. L'analyse de la similitude entre les conditions expérimentales des essais de percolation sur carotte et les conditions réelles de l'écoulement.

Deux modèles de simulation thermodynamique sont étudiés : le modèle de réservoir, focalisé principalement sur le voisinage du forage de réinjection, et le modèle du circuit géothermique incluant les deux forages et le réseau de surface.

Les données de référence utilisées pour les calculs de simulation concernent l'exploitation géothermique du Trias à Melleray ainsi que divers essais d'injection non isothermes réalisés sur des doublets dans le Dogger du Bassin Parisien.

RESUME DES TRAVAUX ET RESULTATS ACQUIS

* Circuit géothermique

Le modèle du circuit géothermique est conçu sur la base d'un ensemble de modules traduisant des longueurs de tubage avec échange thermique de surface (forages, canalisations) et divers éléments singuliers (pompes, échangeurs, vannes, etc.). Au plan numérique, ces divers modules peuvent être assemblés selon une structure pour représenter un réseau réel ou traités séparément. Pour une première analyse grossière, on a examiné essentiellement les forages et canalisations de surface ; les éléments singuliers tels que les deux pompes et l'échangeur sont traduits par une variation locale de température ou de pression.

Le comportement d'un module de système, composé du fluide, d'un tubage, et de son milieu confinant, est obtenu par la résolution locale des 3 équations de bilan usuelles : masse (continuité et distribution des phases liquide et gazeuse), quantité de mouvement, et énergie. On doit y ajouter les relations d'état (viscosité, masse volumique) et diverses relations phénoménologiques empiriques (coefficient de flottement aux parois, fraction volumique gazeuse, régime d'écoulement, etc.). Les équations sont résolues en régime stationnaire et en fonction d'une seule variable d'espace le long de l'écoulement. La variable temps ne concerne que l'évolution de la pression au niveau du réservoir et l'échange thermique aux parois des tubages.

Ce modèle reprend, pour une large part, la structure d'un programme développé en 1980-81 pour l'analyse du comportement d'un forage géothermique à production eau-vapeur (réf. 81 SGN 712 GTH). La longueur Z du forage (ou de la canalisation) est divisée en un certain nombre d'incrément de longueur ; sur chacun d'eux un calcul itératif est effectué afin de satisfaire les 3 équations de conservation en fonction des variations locales des divers paramètres (non linéarités).

Pour chaque forage, les conditions d'exploitation sont fixées au niveau du réservoir ; on y mesure en effet par essais, la pression statique, la température de production et la variation de pression en fonction du débit. Le modèle peut déterminer, compte tenu des lois physiques introduites :

- . les conditions de surface nécessaires pour la production d'un débit donné. Les caractéristiques des pompes introduites dans le circuit sont les éléments actifs à ajuster pour obtenir les valeurs de pression et de température souhaitées dans le réseau de surface.
- . et pour chaque incrément de longueur : les pressions, température, débit et vitesse du fluide et des gaz.

Le choix d'un modèle discrétisé en segments de longueur variable est dû aux différents phénomènes que l'on peut être amené à introduire par la suite : prise en compte des équilibres chimiques, variation de pH accompagnant le dégazage, etc..

Les premiers calculs effectués ne concernent que le fluide monophasique (dépression, refroidissement, recompression), et le contrôle avec les mesures en fonctionnement moyen sur le site. On constate que pour certains débits un dégazage s'amorce au voisinage de la pompe d'exhaure.

Ce phénomène, qui peut avoir une incidence sur le comportement chimique du fluide, est complexe à introduire et nécessite des données expérimentales :

- . la fraction volumique gazeuse potentielle est importante (GLR de l'ordre de $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ à $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$ selon la température),
- . le point de bulle est élevé (13 bars ab. à 70°C),
- . l'analyse de la fraction gazeuse montre des composés inertes mais peu solubles (76 % de N_2 , 12 % de CH_4) et des composés actifs et solubles (10 % de CO_2),
- . la cinétique de redissolution des gaz est encore mal connue, mais il n'est pas impossible que des bulles de gaz (azote par exemple) subsistent au niveau des crépines d'injection avec une incidence sur la compressibilité globale du fluide.

* Comportement du réservoir en injection

Les travaux de modélisation envisagés au voisinage du forage de réinjection ne concernent pas que l'exploitation du Trias, mais plus généralement le comportement d'un doublet géothermique avec réinjection d'un fluide refroidi. Le phénomène principal étudié est l'incidence d'une variation latérale artificielle de mobilité (rapport de la perméabilité intrinsèque à la viscosité) dans une couche homogène. Ce phénomène global est habituellement appelé "effet pariétal" car il ne concerne qu'une zone d'extension réduite autour de l'ouvrage, et se traduit pas une variation de pression supplémentaire au niveau du forage, fonction du débit. C'est ce type d'anomalie quasi-stationnaire qui a été constaté dès la mise en exploitation du doublet de Melleray.

D'après sa définition, une variation latérale de mobilité peut être due à deux causes :

. une variation de perméabilité intrinsèque : endommagement permanent par le forage, d'où un rayon efficace plus faible que le rayon géométrique, variation mobile de porosité liée au déplacement d'agents colmatants.

. une variation de viscosité, conséquence de l'injection d'un fluide refroidi, dans le réservoir isotherme plus chaud.

Au plan de la modélisation, les problèmes à résoudre sont identiques ; on a toutefois distingué deux cas schématiques :

a) le cas du réservoir-composite caractérisé par une distribution radiale du paramètre mobilité, mais constante dans le temps ; forage à facteur de skin positif, ou tests complémentaires pratiqués sur le forage d'injection d'un doublet après une première période d'exploitation (cas des essais de 1982 à Melleray).

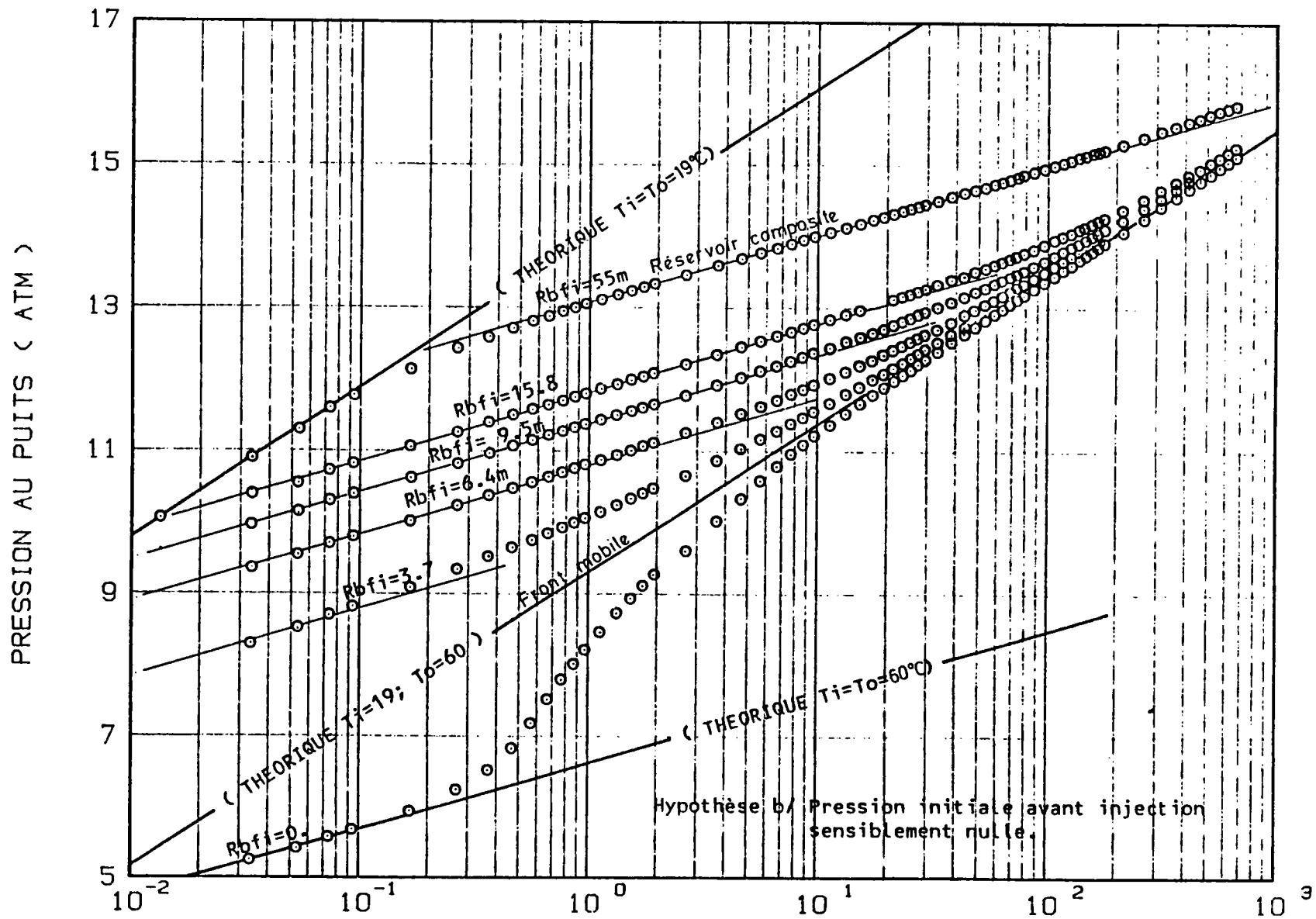
b) le cas du réservoir à front mobile ; déplacement du front thermique ou progression du colmatage de l'espace poreux (cas des essais d'injection non isotherme par exemple).

On constate que les effets quant aux pressions d'exploitation sont très différents. Dans le cas du réservoir-composite la surpression est importante et rapide sur une faible durée puis demeure constante. Au plan pratique il s'agit donc d'un simple décalage constant dans l'échelle des pressions. Dans le cas du réservoir à front mobile la surpression est progressive et se traduit par une dérive dans le temps. Cet effet est classique pour un doublet géothermique : en raison du front thermique mobile, le rabattement à la production est très rapidement stationnaire tandis que la surpression au puits d'injection s'accroît au cours du temps.

Le modèle numérique utilisé (éléments finis) est radial, mono ou bidimensionnel. Il permet le calcul transitoire des variables pression et température (et éventuellement chimiques) en tenant compte des variations locales des paramètres déduites des diverses lois introduites (viscosité, porosité, perméabilité, déplacement de particules, etc.).

Une part importante des travaux a été consacrée à l'examen des méthodes d'interprétation des essais conventionnels sur forage d'injection. Ces essais de courte durée, à débit et température variables, sont très difficiles à interpréter. Un certain nombre de règles pratiques ont pu être dégagées afin d'améliorer la fiabilité des méthodes selon que l'on utilise les techniques analytiques classiques ou le modèle numérique développé.

Les travaux en cours concernent plus particulièrement l'examen et la formulation des mécanismes physiques, mécaniques ou chimiques pouvant entraîner une variation de la porosité et de la perméabilité en fonction du rayon et du temps (dissolution-précipitation et génération-piégeage de particules). Cette approche est étroitement liée au programme expérimental de percolation sur carotte.



TEST DE TYPE INJECTION - ATTENTE - INJECTION
 EN FONCTION DU RAYON DE LA BULLE FROIDE INITIALE

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES



BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES

B.R.G.M.
B.P. 6009
45060 ORLEANS



AGENCE FRANCAISE
POUR LA MAITRISE DE L'ENERGIE

A.F.M.E.
27, Rue Louis Vicat
75015 PARIS

- ETUDE DETAILLEE DU RESERVOIR DU DOGGER -

- Document provisoire -

C O N F I D E N T I E L

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX - TEL. : (38) 63.80.01

ETUDE DETAILLEE DU RESERVOIR

GEOOTHERMIQUE DU DOGGER

J. ROJAS

OBJECTIFS :

Objectif majeur de la recherche géothermique dans le Bassin parisien, les calcaires du Dogger avec 68 forages réalisés fin 83, représentent actuellement le champ géothermique Basse Energie le plus développé au monde. Afin d'aborder les problèmes liés à la prévision de la ressource géothermique et à sa gestion rationnelle, une étude détaillée du Dogger a été entreprise. Elle fait suite à un premier travail réalisé en 82 dans le forage géothermique d'Aulnay/Bois.

MOYENS :

Dès les premières investigations détaillées, le réservoir s'est révélé de structure beaucoup plus complexe que l'on ne l'estimait de premier bord. Pour mener à bien les travaux, une équipe a été constituée pour traiter des domaines suivant avec une coordination satisfaisante.

- Sédimentologie
- Géochimie
- Thermique
- Modélisation hydrodynamique et thermodynamique

CONSEQUENCES ATTENDUES :

La meilleure caractérisation du Réservoir "Dogger" aura pour conséquence de mieux aborder les problèmes liés :

- 1) A la prévision de la ressource géothermique
 - . définition de la hauteur productrice
 - . caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité, débit...)
 - . caractéristiques du fluide géothermal (salinité, température).
- 2) A l'exploitation
 - . corrélation des niveaux productifs entre ouvrages
 - . type de production fissurale ou matricielle
 - . écartement du doublet et durée de vie
- 3) A la gestion
 - . définition plus réaliste de périmètres de protection
 - . interférences possibles entre doublets
 - . exploitation rationnelle de l'aquifère

- ETUDES SEDIMENTOLOGIQUES -

J. Rojas - D. Giot

OBJECTIFS

Le but de cette étude est d'établir une meilleure caractérisation sédimentologique et diagraphique du réservoir et particulièrement des niveaux productifs ; une meilleure compréhension des phénomènes de diagenèse et leurs conséquences sur l'évolution du réseau poreux, l'étude des relations entre hauteur poreuse et hauteur productrice, les corrélations géologiques puits à puits afin d'essayer d'élaborer un modèle hydrodynamique du réservoir en relation avec la sédimentation, la diagenèse et la fracturation.

RESUME DES TRAVAUX ET RESULTATS ACQUIS

L'étude réalisée en 1983 apporte des indications complémentaires sur la structure véritable du réservoir géothermique du Dogger en région parisienne et plus particulièrement dans le département de la Seine St Denis. Cette zone d'étude a été sélectionnée en raison de la densité des ouvrages réalisés (22 forages géothermiques fin de 1983) dont un (Aulnay-sous-bois) a fait l'objet d'un carottage intégral.

- Analyse faciologique et séquentielle

A partir du sondage référence carotté d'Aulnay-sous-bois sur lequel une analyse sédimentologique fine et un jeu complet de diagraphies ont été réalisés, une corrélation avec 18 forages avoisinants a été tentée.

Les analyses sédimentologiques destinées à caractériser les faciès et le réseau poreux ont été réalisées sur des cuttings.

Le découpage séquentiel obtenu par examen direct à la loupe binoculaire et observation de quelques montages en lames minces permet de retrouver les coupures faciologiques majeures : à savoir l'ensemble inférieur des alternances, l'ensemble oolithique, puis l'ensemble Comblanchien. Les subdivisions en séquence d'ordre inférieur telles qu'établies à Aulnay-sous-bois sont plus difficiles à identifier.

Cette imprécision est en partie imputable à la médiocre représentativité des cuttings (faible récupération et taille très fine des déblais de forage) mais également à une variation rapide des faciès principalement dans l'ensemble des alternances.

- Relations faciès - niveaux productifs

L'étude des carottes d'Aulnay-sous-bois a déjà montré que les grainstones originaires de milieux sédimentaires similaires, initialement poreux, peuvent avoir des caractéristiques réservoirs différentes selon leur évolution diagénétique. Les faciès grainstones de l'ensemble oolithique ont été préservés des actions diagénétiques colmatantes, leur porosité a été secondairement améliorée par des phénomènes importants de fracturation et dissolution.

Les grainstones de l'ensemble des alternances au contraire ont eu une évolution diagénétique défavorable dont la conséquence a été la perte de perméabilité (compaction-cimentation).

L'analyse structurale détaillée des carottes d'Aulnay confirme la liaison directe entre la fréquence des fractures et celle des cavités de dissolution, le développement maximum étant resté au niveau de l'ensemble oolithique.

Afin d'établir une corrélation entre le niveau productif bien caractérisé d'Aulnay-sous-bois et ceux des forages avoisinants les cuttings, de ces forages plus particulièrement ceux des niveaux productifs ont été montés en lames minces afin de caractériser le réseau poreux préalablement saturé par une résine colorée.

Du fait de la fine fragmentation des cuttings la porosité matricielle est aisément identifiée, par contre la porosité de dissolution dont l'existence est nécessaire pour expliquer la productivité ne peut être appréhendée par cette technique dans ses manifestations fissurales ou cavitaires.

D'une façon générale sur l'ensemble des sondages le niveau producteur principal (supérieur à 50 % de la production du puits) se situe systématiquement dans l'ensemble oolithique (fig. 1).

Le reste de la production est assuré par de petits niveaux de répartition aléatoire au sein de l'ensemble Comblanchien. Le faciès oolithique de l'ensemble des alternances ne participe qu'occasionnellement à cette production.

Il semble donc exister une corrélation permanente dans le secteur étudié entre : le faciès oolithique initialement poreux, des conditions diagénétiques privilégiées permettant la conservation de cette porosité matricielle, et une amélioration de cette porosité par fracturation-dissolution.

L'explication de cet ensemble de phénomènes à l'origine de la formation de cet horizon à forte productivité n'est pas à ce stade de l'étude encore claire.

A titre d'hypothèse de travail, on peut envisager deux types de modèles totalement différents : l'un ferait intervenir un processus de microkarstification développé à partir d'une paléosurface d'émersion au Bathonien terminal, la zone d'alimentation correspondant à la barrière oolithique (en zone centrale du bassin actuel) seule zone émergée à l'époque par rapport au lagon et à la mer ouverte, l'autre ferait intervenir un processus de dissolution phréatique lié à la circulation de nappes alimentées par l'aval (voisin de l'affleurement actuel), mis à nu par des paléosurfaces successivement développées à la limite Jurassique-Crétacé, au Tertiaire, et au Quaternaire.

Dans les travaux à venir une priorité sera donnée à l'étude des phénomènes diagénétiques à l'origine de la genèse d'un tel réservoir.

En particulier seront tentées des analyses susceptibles de différencier qualitativement les phases successives de cimentation par analyse de leur rapport isotopique (oxygène, carbone, strontium) et par analyse en cathodoluminescence

ANALYSE DIAGRAPHIQUE

Les résultats des travaux réalisés dans le forage géothermique d'Aulnay-sous-bois 1, ont montré qu'il était possible d'établir une bonne corrélation entre les faciès géologiques déterminés à partir de carottes et les électrofaciès mis en évidence par le choix, la pondération et la combinaison d'un jeu de diagraphies adéquat.

Une fois que de bonnes corrélations sont établies dans un puits entre diagraphies et carottes, et par application du principe de causalité (les mêmes causes produisent les mêmes effets), des informations géologiques valables peuvent être tirées dans les puits voisins à partir seulement des diagraphies. La qualité des résultats dépendra alors du choix correct du jeu de diagraphies dont des informations suffisantes pour distinguer les faciès souhaités.

Cette analyse a été effectuée dans le puits de Blanc-Mesnil Nord 1 grâce au programme FACIOLOG qui permet la détermination automatique des électrofaciès. Les diagraphies complémentaires nécessaires pour cette étude et qui n'étaient pas prévues dans le programme initial du Maître d'Ouvrage ont été prises en charge par le Comité Géothermie de l'AFME. Les résultats de cette étude sont présentés dans le rapport(.....)

Les développements ultérieurs du programme FACIOLOG porteront surtout sur l'analyse de la forme des courbes et l'incorporation de cette donnée dans l'identification et la caractérisation des zones. Par l'apport supplémentaire de l'intelligence artificielle et du traitement du signal pour identifier les pentes et les formes variées plus complexes, on accèdera à une autre dimension dans l'utilisation automatique des diagraphies.

Une autre application géologique de diagraphies différées est mise au point avec M. LEBRETON (IFP) d'une diagraphie de perméabilité par méthode acoustique.

Cette méthode, dite de l'indice I_G est fondée sur une caractéristique simple du signal délivré par une sonde acoustique. Des études fondamentales ont en effet montré que l'accroissement de l'atténuation des ondes avec la fréquence est d'autant plus élevée que la perméabilité est

grande et que le début du signal réagit très fortement à cette atténuation différentielle.

L'indice I_c relevé sur l'onde de compression du signal acoustique d'un outil traditionnel varie avec la perméabilité K de la roche dans laquelle l'onde s'est propagée.

Une loi de la forme simple suivante a pu être proposée et vérifiée sur différents sites :

$$I_c = a \log \frac{K}{\mu} + b$$

a et b étant des constantes à déterminer et dépendant de l'outil utilisé essentiellement, μ étant la viscosité du fluide saturant la roche.

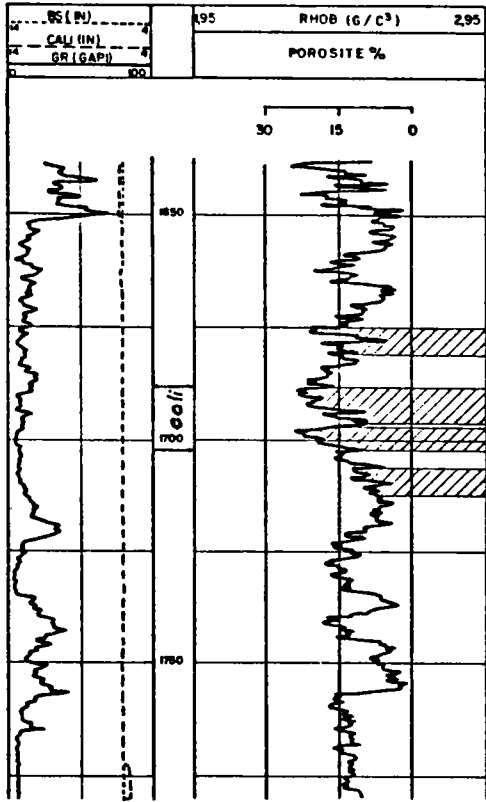
A titre d'exemple on donne ci-après les I_c calculés dans les forages d'Aulnay (GAY-1) et Sevran (GSA-1) comparés avec le débitmètre.

TRAVAUX EN COURS

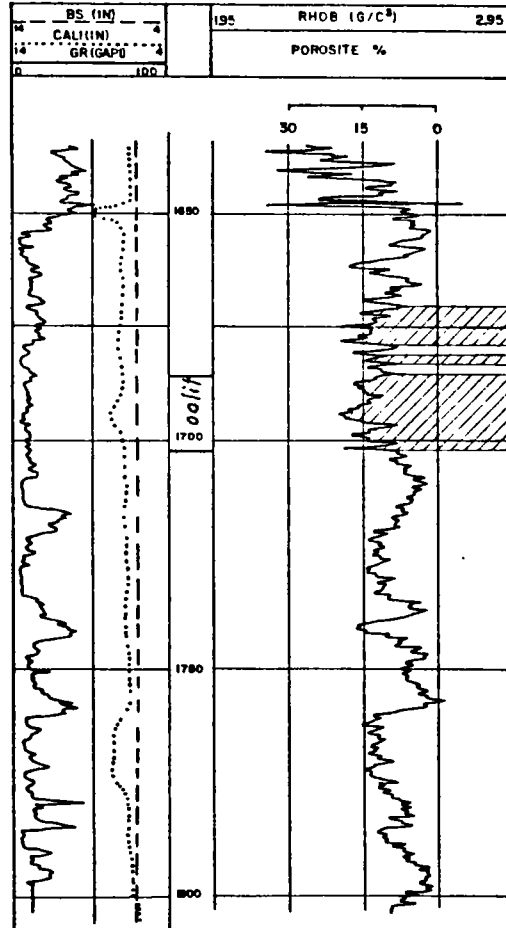
Analyse séquentielle et faciologique des derniers forages géothermiques réalisés en région parisienne (Aulnay 3 et 4, La Villette 1 et 2). Rapport prévu en fin d'année 1983 relatif aux ouvrages de l'ensemble du Nord Est Parisien (environ 20 sondages géothermiques).

Extension de l'étude en intégrant les données de la sédimentologie et de l'étalonnage d'électrofaciès réalisés par Elf dans les forages pétroliers de la région. Un accord de coopération a été aussi conclu avec Géotherma pour disposer des échantillons du Dogger pour les puits dont elle assure la maîtrise d'oeuvre.

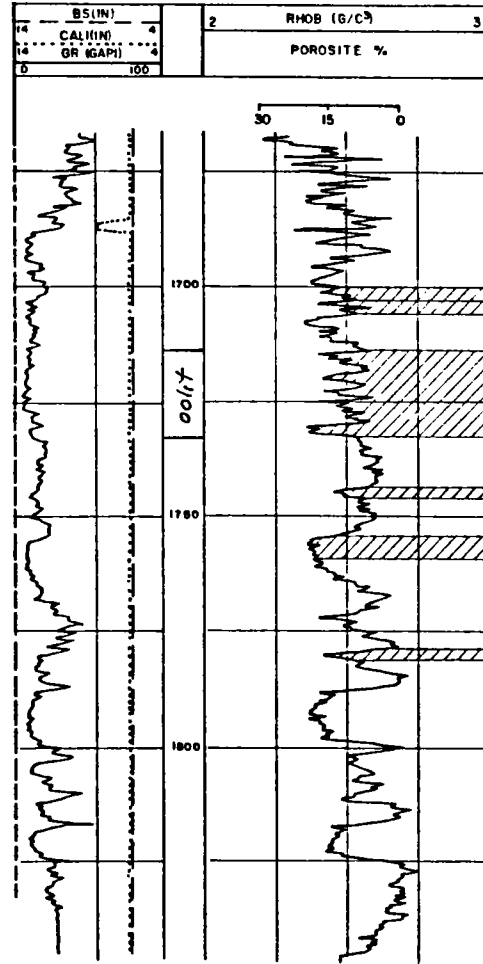
LA COURNEUVE NORD 1



LA COURNEUVE SUD 1



AULNAY / BOIS 1



CLICHY / BOIS 1

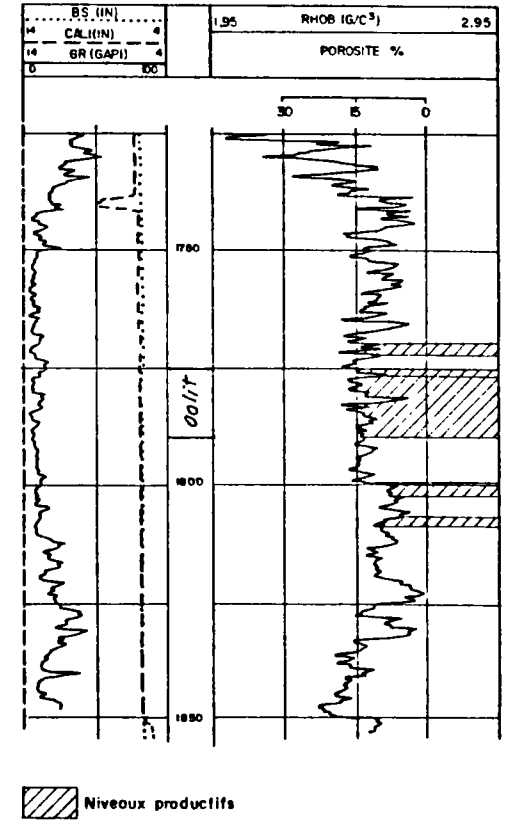
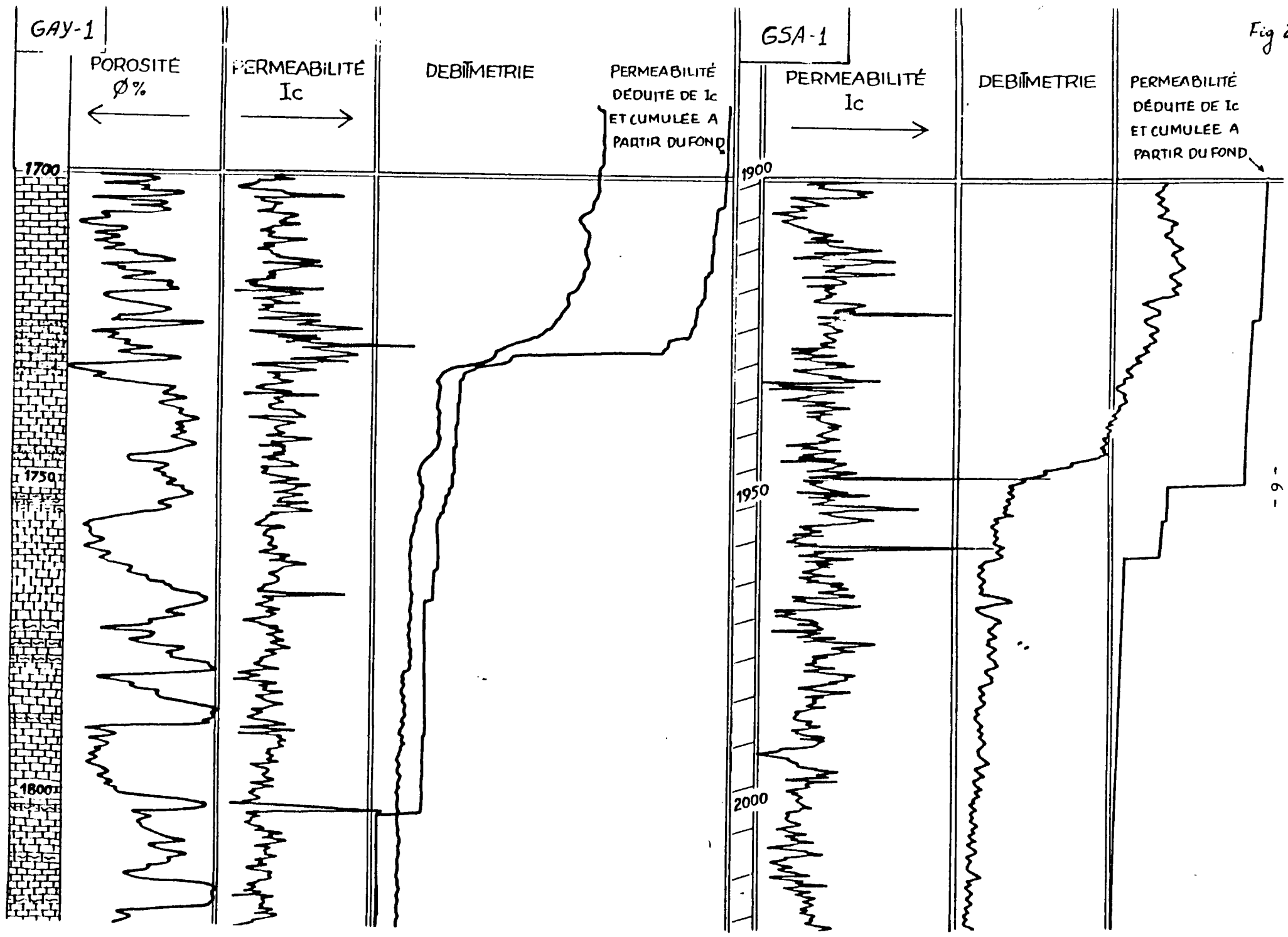


FIG 1

Fig 2



ETUDE ISOTOPIQUE (O,C) PRELIMINAIRE DES PHASES CARBONATEES
D'ECHANTILLONS DU DOGGER - AULNAY

par

A.M. FOUILLAC* - J.F. SUREAU** - J. ROJAS***

* MGA ** GMX *** IRG

Les analyses isotopiques (carbone, oxygène) des carbonates étudiés sont reportées dans le tableau 1. Les différentes phases sont positionnées sur la figure 1.

La calcite des oolithes présente des $\delta^{18}\text{O}$ et des $\delta^{13}\text{C}$ typiques de carbonates sédimentaires en milieu marin.

Les calcites qui cimentent ces oolithes présentent par contre un appauvrissement net en $\delta^{18}\text{O}$. Ceci peut résulter soit d'un apport d'eaux météoriques, soit d'une élévation de température.

Un apport d'eaux météoriques, qui correspondrait à une épisode d'émersion, devrait également s'accompagner d'un appauvrissement en $\delta^{13}\text{C}$. Or ici les $\delta^{13}\text{C}$ restent positifs. On peut donc penser que l'appauvrissement en $\delta^{18}\text{O}$ de ce ciment calcitique est plutôt dû à une élévation de température.

Si le phénomène thermique s'est produit en milieu marin, la température d'équilibre calculée entre ce ciment ($\delta^{18}\text{O} = +21.4$) et l'eau de mer ($\delta^{18}\text{O} = 0$), est de l'ordre de 80°C. (Elle serait de l'ordre de 100°C pour la calcite de la géode). Il est toutefois plus raisonnable de penser que ce ciment s'est déposé postérieurement, comme semble le montrer les résultats de strontium (cf. partie géochimique de cette étude). Les solutions qui circulent actuellement dans ces sédiments ont un $\delta^{18}\text{O}$ de - 4 ‰. Le dépôt de ce ciment de calcite à partir de cette solution se serait fait à 53°C. Le même calcul pour la calcite de la géode donne une température de 69°C. Ce qui correspond à la température de fond de puits mesurée actuellement. Cette solution ($\delta^{18}\text{O} = - 4$ ‰) correspond probablement à d'anciennes eaux météoriques évoluées. (cette étude - partie géochimique). Ce qui est le cas de nombreuses eaux de formation de bassins sédimentaires. (Clayton et al, 1966 ; Hitchon et Friedman, 1969 ; Kharaka et al, 1972 ; Dowgiallo et Tongiorgi, 1972).

Au cours de leur évolution ces eaux de formation ont perdu leur $\delta^{13}\text{C}$ initial du CO_2 par échange (dissolution) avec le stock carbone des carbonates. Ceci explique qu'il n'y ait pas eu appauvrissement des $\delta^{13}\text{C}$. L'effet de température est également faible sur les $\delta^{13}\text{C}$.

Les dolomites qui cimentent également les oolithes ont des $\delta^{18}\text{O}$ semblables à celui du ciment calcitique. Ceci indique que ces deux phases n'ont pas précipitées simultanément sinon le $\delta^{18}\text{O}$ de la dolomite serait supérieur de 4 à 6 ‰ à celui de la calcite. Il ne semble pas qu'on ait affaire à une substitution de la calcite par la dolomite d'après l'étude pétrographique.

Le calcul des températures à partir du $\delta^{18}\text{O}$ des dolomites et du fluide actuel donne des valeurs comprises entre 70 et 90°C, compatibles avec l'histoire thermique de la formation.

En résumé, on peut dire que la cimentation des oolithes marines ne s'est pas faite lors d'une émergence mais postérieurement, au cours de l'enfouissement, en équilibre avec des eaux de formation.

Pour étayer cette première interprétation il serait souhaitable de compléter les analyses (particulièrement pour le ciment calcitique dont une seule valeur est disponible actuellement) et d'étendre la zone de l'échantillonnage en fonction du gradient thermique.

Bibliographie

- Clayton R.N., Friedman I., Graf D.L., Mayeda T.K., Meents W.F. and Shimp N.F. (1966) - The origin of saline formation waters : I. Isotopic composition : Jour. Geophys. Research, v. 71, p. 3869-3882.
- Dowgiallo J. and Tongiorgi E. (1972) - The isotopic composition of oxygen and hydrogen in some brines from the Mesozoic in northwest Poland : Geothermics, v. 1, p. 67-69.
- Hitchon B. and Friedman I. (1969) - Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin - I. Stable isotopes of hydrogen and oxygen : Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 33, p. 1321-1349.
- Kharaka Y.K., Berry F.A.F. and Friedman I. (1973) - Isotopic composition of oil-field brines from Kettleman North Dome, California, and their geologic implications : Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 37, p. 1899-1903.

AULNAY



Ciment de dolomite macrospathique

Calcite géodique

Oolithe calcitique

1730,9

X 20



X 65

Détail du ciment macrocristallin
dolomitique à extinction ondulante



X 65

Détail du ciment de calcite
microcristalline.

TABLEAU 1 : ANALYSE ISOTOPIQUE DU CARBONE ET DE L'OXYGENE SUR DIFFERENTS CARBONATES SEPARES DU SONDAGE AULNAY (DOGGER).

			$\delta^{18}\text{C} \text{ ‰ v.s. PDB}$	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰ v.s. SMOW}$
1 - AULNAY	39	1725,30 m calcite géodique	+ 1,7 ± 0,1	- 11,7 ± 0,1	+ 18,8 ± 0,1
2	"	39 1725,30 m calcite ciment	+ 1,8 ± 0,1	- 9,2 ± 0,1	+ 21,4 ± 0,1
3	"	39 1726,72 m calcite oolithe	+ 2,3 ± 0,1	- 2,2 ± 0,1	+ 28,6 ± 0,1
4	"	39 1726,72 m dolomite ciment	+ 3,0 ± 0,1	- 11,5 ± 0,1	+ 19,0 ± 0,1
5	"	24B 1730,95 m calcite oolithe	+ 2,6 ± 0,1	- 2,5 ± 0,1	+ 28,3 ± 0,1
6	"	24B 1730,95 m dolomite ciment	+ 2,9 ± 0,1	- 8,4 ± 0,1	+ 22,2 ± 0,1

the 1990s, the number of people with a mental health problem has increased in the UK (Mental Health Act 1983).

There is a growing awareness of the need to improve the lives of people with mental health problems. The Government has set out a strategy for mental health care in the UK (Department of Health 1999). The strategy is based on the following principles:

- People with mental health problems should be treated as individuals.
- People with mental health problems should be given the opportunity to participate in decisions about their care.
- People with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes.

The strategy also states that people with mental health problems should be given the opportunity to live in their own homes. This is a key objective of the strategy and is a key objective of the strategy.

ETUDE GEOCHIMIQUE DES FLUIDES DU DOGGER

F. Iundt, C. Fouillac, G. Ouzounian

INTRODUCTION

Le Bassin Parisien représente actuellement un des champs géothermiques basse énergie, le plus développé au Monde, fournissant un potentiel de données considérable apportant ainsi une meilleure connaissance des eaux chaudes des réservoirs sédimentaires.

Les objectifs de cette étude visent à la connaissance approfondie des fluides du Dogger pour en optimiser l'exploitation. Ceci exige de comprendre :

- l'origine des fluides,
- les paramètres hydrogéochimiques de l'aquifère,
- la composition chimique très détaillée des niveaux producteurs afin de prévoir leur comportement dans une exploitation à long terme,
- l'impact des compositions chimiques sur les problèmes de dépôts et corrosions des installations de surface.

Sur l'ensemble du bassin, 32 doublets géothermiques atteignant le Dogger ont été réalisés, comportant 1 puits de production et 1 puits de réinjection. Certaines opérations géothermiques fonctionnent depuis déjà de nombreuses années : Carrières sur Seine 1968 ; Melun Almont 1970 ; Villeneuve-la-Garenne 1975 ; Creil 1976 ; Coulommiers 1980. C'est au cours de ces trois dernières années que ce sont effectuées l'essentiel des opérations géothermiques et notamment dans le Nord de la région parisienne : Aulnay, Cergy, Evry, La Courneuve Sud 1981 ; Blanc Mensil, Creil, Epernay, Fontainebleau, La Courneuve Nord, La Porte St Cloud, Meaux... 1982 ; Chatenay Malabry, Garges, Orly, La Villette, etc. 1983.

ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE

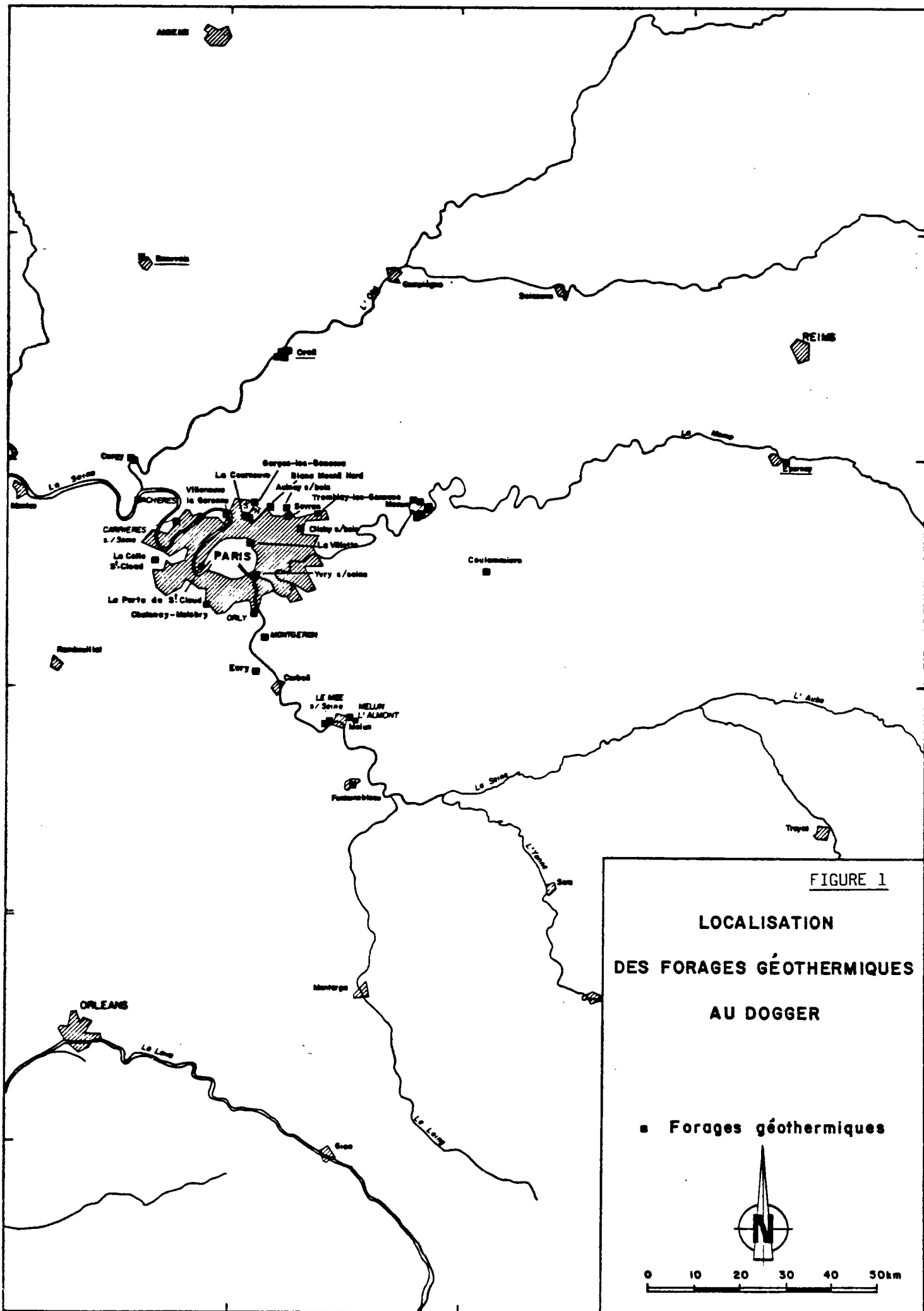
Localisation des puits géothermiques

La figure 1 montre l'ensemble des opérations géothermiques réalisées jusqu'à ce jour. Nous avons distingué les installations en service ou en cours de raccordement pour la période de chauffe 1983-1984. Les forages effectués en 1983 sont actuellement fermés et mis en saumure en attendant la construction des équipements de surface (chaufferie, canalisations, pompe, etc.).

Divers types de prélèvements

Deux types de prélèvements ont été réalisés pour cette étude :

- sur les doublets au cours des essais de fin de forage :
 - . prélèvements de fond à différents niveaux
 - . prélèvements de surface :
 - . à différents débits (en débit artésien)
 - . avant acidification
 - . après acidification



- sur les doublets raccordés (installation géothermique en service) :
 - . prélèvements de fond à différents niveaux
 - . prélèvements de surface (en pompage)

Techniques de prélèvements et analyses in situ

a) Echantillonneur de fond :

Un préleveur de type Klyen à déclenchement par inertie a été utilisé pour les prélèvements de fond :

- une ligne de transfert des échantillons, répondant à nos besoins, a été conçue afin d'obtenir toutes les caractéristiques chimiques du fluide profond (séparation gaz-eau sans contamination atmosphérique ; circulation d'azote pour éviter l'oxydation des formes réduites du soufre).

b) Prélèvements et mesures de surface en tête de puits : (fig. 2)

- . filtration directe du fluide :

On utilise la pression artésienne ou de pompage des installations pour filtrer les eaux avant les différents conditionnements spécifiques aux diverses analyses ; on évite ainsi toute contamination atmosphérique éventuelle.

- . séparation eau-gaz :

Les gaz dissous dans l'eau du gisement sont libérés lors de la diminution de pression pendant la remontée vers la surface. Un séparateur permet de réaliser des prélèvements sur la phase gazeuse ainsi que des prélèvements et mesures en circulation sur la phase liquide.

- . mesures physico-chimiques en circulation :

Différents paramètres physico-chimiques sont mesurés sur les eaux géothermales en circulation et après séparation des gaz libérés : température, pH, EH, conductivité.

- . analyses in situ :

Certaines espèces non conservatives sont mesurées sur le site au moment même du prélèvement :

- espèces réduites du soufre :

Un effort particulier a été fait sur les analyses in situ des différentes espèces réduites du soufre afin de mieux saisir les équilibres chimiques réglant les concentrations de ces éléments en solution. L'acquisition récente d'une chaîne de titration a permis de quantifier précisément les différentes espèces du soufre (sulfures, mercaptans, thiosulfates, sulfates).

Alcalinité totale :

En collaboration avec l'Université Paris VII (Pr. MICHARD) les analyses de la réserve alcaline sont réalisées in situ dans une cellule spécifique

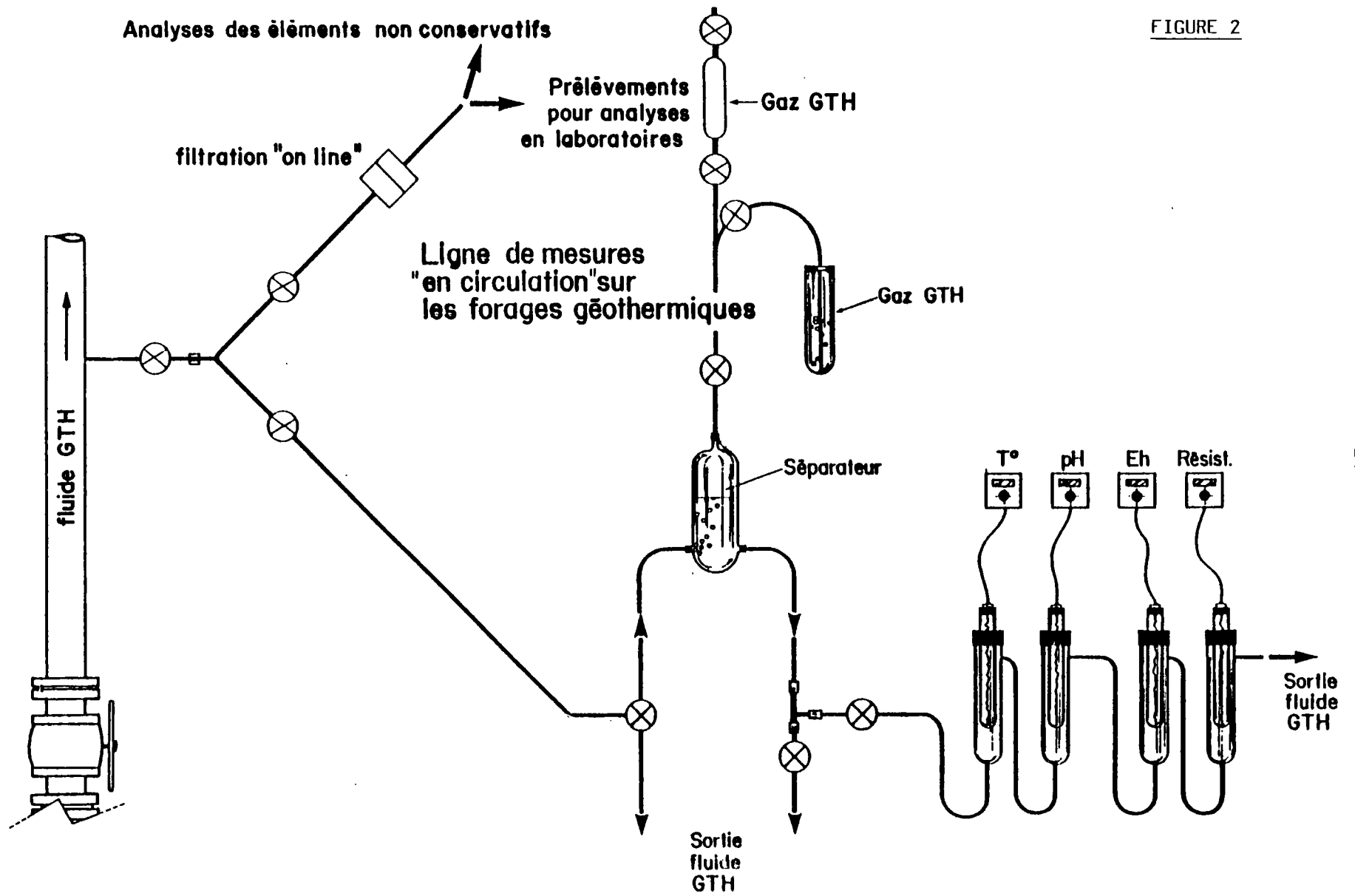


FIGURE 2

interdisant les dégazeages. Parallèlement une étude est effectuée sur la question de représentativité des mesures de pH dans les eaux chargées en sels afin de vérifier si les mesures de pH sont représentatives de l'activité des ions hydrogènes ou s'il existe des artefacts dus au potentiel de jonction des électrodes de mesure ; les solutions de remplissage interne étant mal adaptées à des fluides aussi minéralisés.

Analyses de laboratoire

Après filtration et divers conditionnements spécifiques, les échantillons sont ensuite analysés au laboratoire d'analyses du BRGM.

- Phase liquide :

* analyses chimiques :

- . éléments majeurs : Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃, SO₄
- . éléments traces : Mn , SiO₂, Li, Sr, B, F, Fe,
- . éléments infratraces : Al, As, Cs, I, Br

* analyses isotopiques :

- . deuterium oxygène 18
- . soufre 34, (sulfates et sulfures)
- . oxygène 18 des sulfates
- . Sr 87/86 de l'eau et des carbonates

- Phase gazeuse :

- * analyse chromatographique : CO₂, N₂, O₂, H₂S, He, H₂,
CH₄, C₂H₆, Ar

RESULTATS ET INTERPRETATIONS PRELIMINAIRES

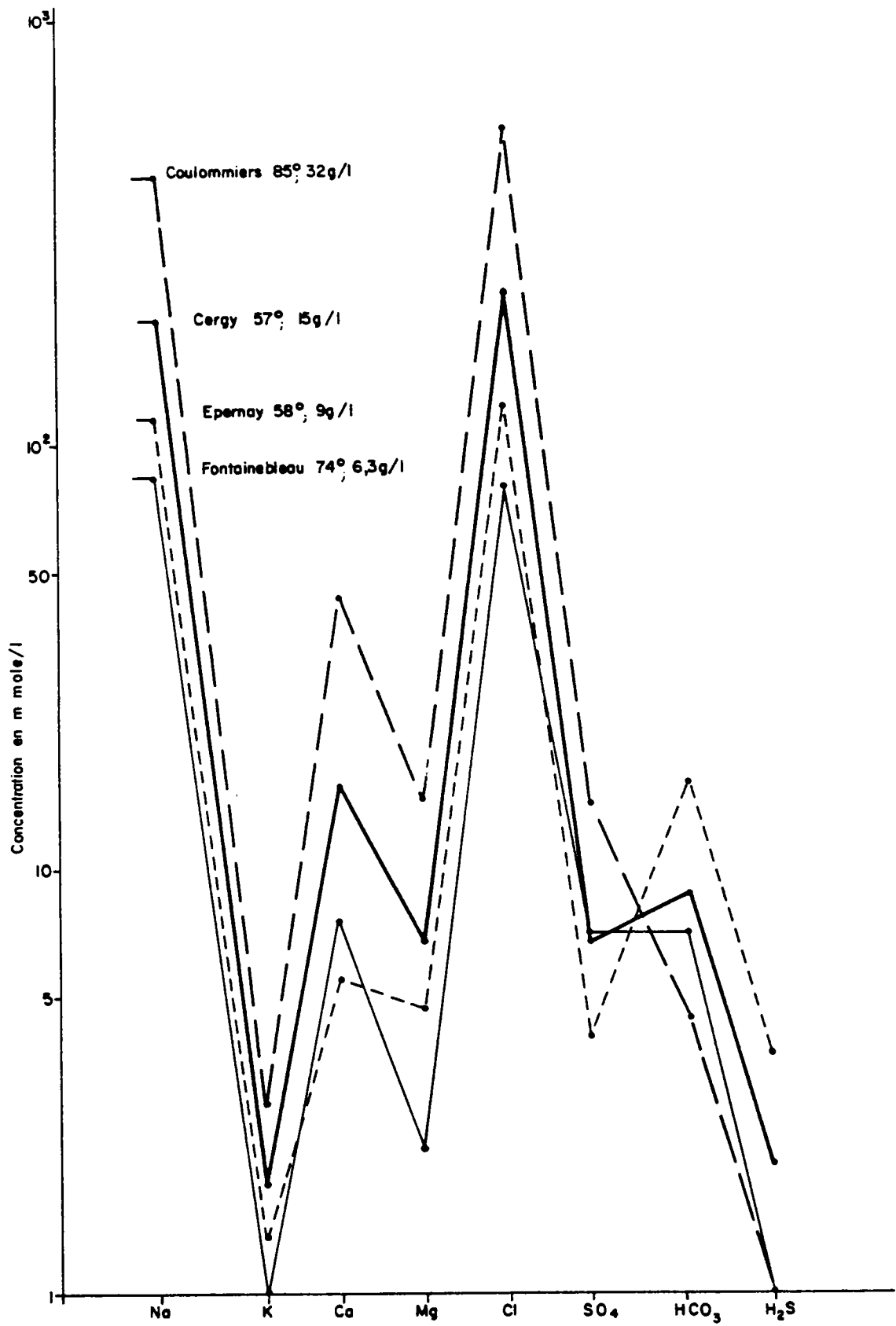
Dans le cadre de ce rapport d'avancement nous ne présenterons pas les tableaux récapitulatifs des analyses chimiques et isotopiques des eaux et des gaz. Ils seront regroupés dans le rapport détaillé de l'étude du Dogger. Nous n'exposerons que les interprétations préliminaires de ces premiers résultats.

VARIATIONS REGIONALES DE LA COMPOSITION CHIMIQUE

Les températures des eaux géothermales des puits au Dogger varient de 47° (Beauvais) à 85° (Coulommiers). Elles sont dans l'ensemble bien corrélées à la profondeur de l'aquifère.

Les minéralisations totales s'étendent de 6,3 g/l (Fontainebleau) à 33 g/l (Coulommiers). Dans ce domaine important de salinité, les compositions chimiques sont tout à fait comparables et représentées par des eaux chlorurées

FIGURE 3



sodiques avec des teneurs variables en H_2S . Le diagramme de la figure 3 montre assez bien cette similitude.

Si les salinités les plus fortes se rencontrent au centre du Bassin (Coulommiers, Meaux), les lois qui règlent les minéralisations totales ne paraissent pas aussi simples que pour les températures. Les forages de Creil et Epernay, atteignant la même profondeur, (-1500 m environ) possèdent des salinités totalement différentes (28 g/l et 8,7 g/l respectivement). La répartition des salinités présentées dans la figure 4 met nettement en évidence un gradient de salinité de direction nord-ouest/sud-est sensiblement parallèle au grand accident de la faille de Bray. Cette orientation correspondrait à une circulation de direction préférentielle, au moment de la mise en charge de cet aquifère captif par des eaux météoriques.

VARIATION VERTICALE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE A L'ECHELLE D'UN Puits

Afin de déterminer l'homogénéité chimique des différents niveaux producteurs du Dogger, nous avons réalisé des prélèvements de fond sur différents types de forages géothermiques :

- forages récents : au moment de la production initiale au cours des tests de fin de sondage ;
- forages anciens : après une production de longue durée de quelques années.
- Forages récents : cas de Tremblay 1

Au cours des essais de fin de forage de production de Tremblay 1, les résultats de diagraphies et du flowmètre ont permis de localiser précisément les différents niveaux producteurs et de quantifier leurs débits relatifs.

Différents prélèvements de fond ont été réalisés lors d'une production en débit artésien :

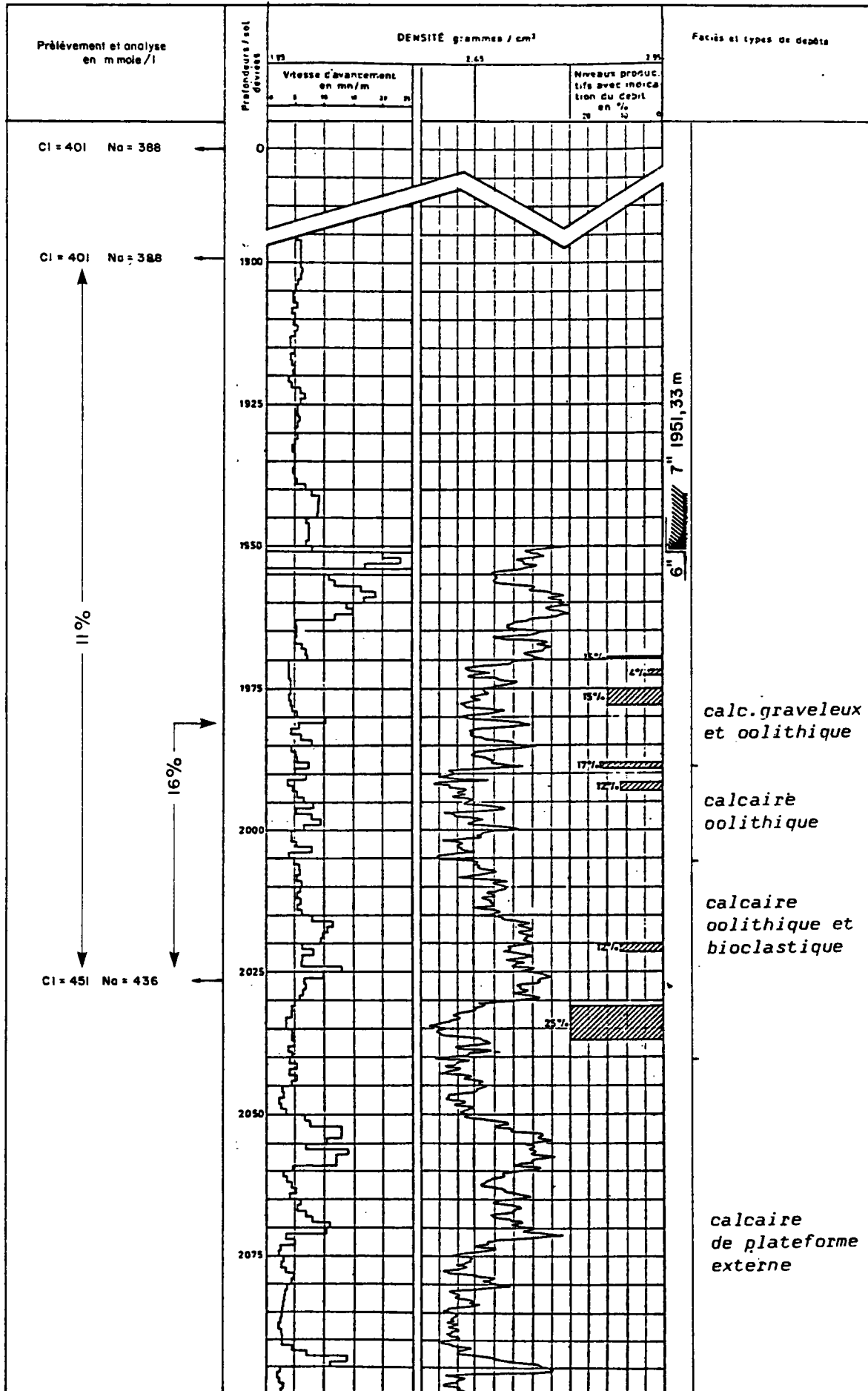
- à 1800 m (dévié) : deux prélèvements au-dessus du sabot du tubing représentant l'intégration de l'ensemble des niveaux productifs.
- à 2027 m (dévié) : pour échantillonner le dernier niveau participant pour 25 % de la production totale.

Simultanément un prélèvement de surface (gaz et eau) a été effectué en tête de puits.

L'ensemble des résultats sont résumés dans la figure 5. On remarque que les deux échantillons de fond, dans le tubing à 1800 m et celui de surface, sont identiques. Le dernier niveau producteur situé à 2027 m possède un fluide de minéralisation plus forte : 11 % par rapport au débit total et 16 % par rapport au débit des autres niveaux.

- Forages anciens : cas de Creil 3

Les installations géothermiques de Creil sont en service depuis 1977 avec un débit artésien de 120 m³/h pour le forage de Creil 3. L'absence de pompe de production à l'intérieur du tubing nous a permis de descendre un préleveur afin de réaliser différents échantillonnages de fond au cours de la production normale d'exploitation.



Cinq échantillons de fond ont été prélevés :

- à 1570 m : 2 prélèvements au dessus du niveau producteur le plus profond,
- à 1535 m : 1 prélèvement au dessus des 2 derniers niveaux producteurs,
- à 500 m : 2 prélèvements pour obtenir l'intégration des différents niveaux.

Un échantillon de surface a été prélevé également en tête de puits.

L'ensemble des résultats montre une composition chimique parfaitement identique pour ces six échantillons. Seul, les teneurs en sulfures sont différentes entre les prélèvements de fond et celui de surface (11.10^{-3} et 16.10^{-3} mole/litre respectivement). Cette variation a pour origine des précipitations de sulfures métalliques ayant lieu au sein du préleveur dû à la baisse de température et au dégazage de l'échantillon avant son transfert pour l'analyse peuvent expliquer ces différences.

Aucune variation de composition chimique n'a pu être observée entre les niveaux productifs. On peut donc constater qu'après une production de longue durée, il existe une certaine homogénéité chimique entre les fluides des différents niveaux producteurs. Il serait intéressant après ces premiers résultats de réaliser un flowmètre afin de vérifier que les débits relatifs des différents niveaux producteurs n'ont pas évolués, ce qui permettrait aussi de mettre en évidence d'éventuels niveaux dont la production irait en décroissant au cours du temps.

EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE EN DEBUT DE PRODUCTION

Nous avons enregistré des différences importantes dans la composition chimique des échantillons prélevés en fin de sondage et ceux prélevés au cours de la production d'exploitation après raccordement du réseau de surface. Dans le cas du forage d'Epernay, par exemple, 18 % de diminution de minéralisation totale après 1 semaine de production. Nous avons donc été amenés à étudier l'évolution de la composition chimique en début de production.

Cas de La Villette 2 :

Différents échantillons ont été prélevés au cours des tests de fin de sondage du puits de réinjection de la Villette 2. Il existe une étroite relation entre le débit total et la composition chimique de l'eau, comme on peut le constater dans le diagramme de la figure (6). Soit en débit artésien ou par air lift avant acidification de l'aquifère, soit par débit artésien après acidification. Ce phénomène peut être transitoire et tendre vers un "état d'équilibre" après une production suffisamment importante.

Pour préciser ces variations de composition chimique des différents niveaux producteurs ainsi que leur évolution au cours du temps, nous allons réaliser une étude détaillée sur le forage de production de la Villette (log de porosité, flowmètre, prélèvements de fond à différents niveaux, prélèvements de surface en fonction du temps et du débit).

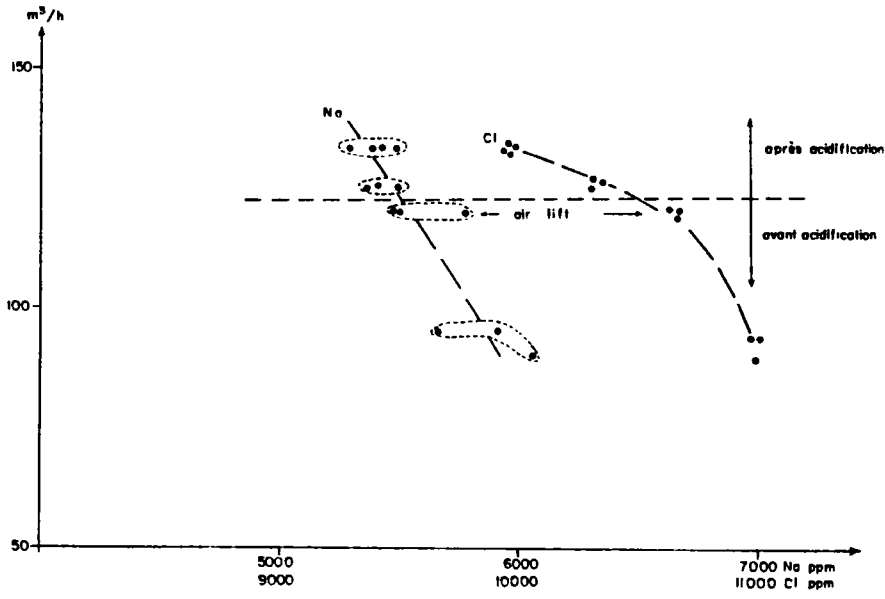


FIGURE 6

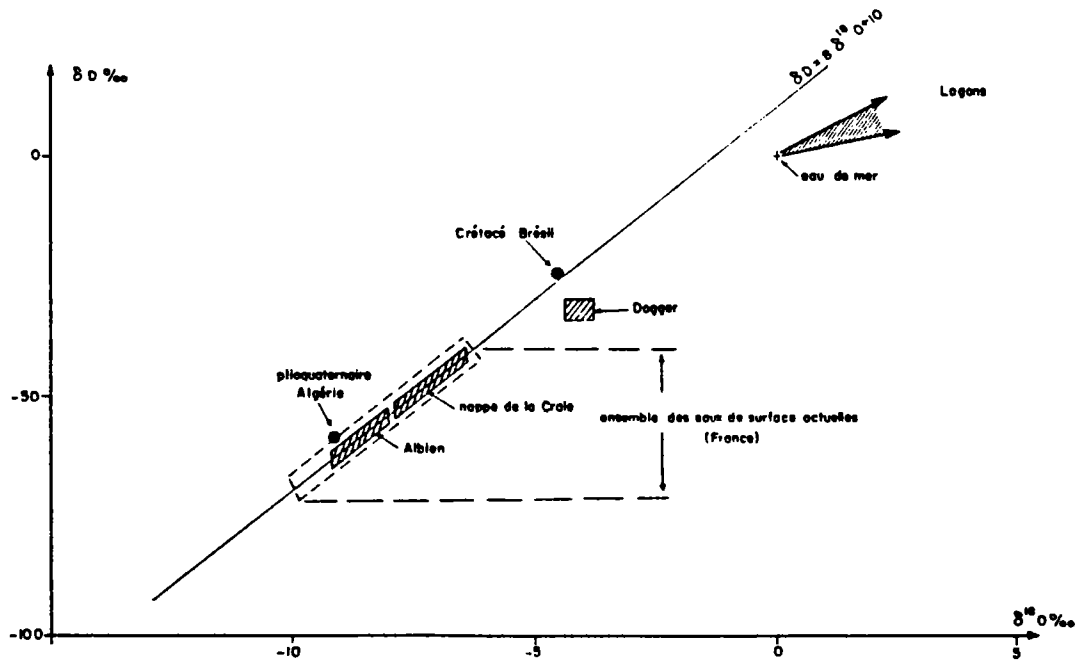


FIGURE 7

ORIGINE DES EAUX

Les premiers résultats des analyses isotopiques en deuterium et oxygène 18 nous ont permis de replacer les eaux du Dogger dans le contexte des eaux souterraines. Comme on le remarque sur la figure 7 l'aquifère du Dogger se place bien le long de la droite des eaux météoriques $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ avec un léger enrichissement en ^{18}O , fréquemment enregistré dans les eaux de formations de températures anormales. L'ensemble des valeurs isotopiques se regroupent ($D = -33 \%$; $^{18}O = -4 \%$) dans un domaine nettement différent de celui des eaux de surfaces actuelles ainsi que les eaux souterraines des autres aquifères du Bassin Parisien (figure 7).

Ce domaine très restreint des valeurs isotopiques des eaux du Dogger obtenues pour des salinités variables, est très nettement distincte de la composition isotopique des eaux de mer (0 % en deuterium et oxygène) où des lagons, comme on le remarque sur la figure 7.

On peut donc, dès à présent, rejeter l'idée d'un mélange entre une eau de mer fossile, plus ou moins évaporée, et des eaux météoriques de faible salinité. En outre, dans un diagramme de Deuterium-Chlorure figure 8, on constate que les valeurs de Deuterium sont constantes (à la précision des mesures) quelles que soient les salinités des fluides (de 11 à 33 g/l).

Les premiers résultats de cette étude permettent de définir un modèle hydrogéochimique pour l'alimentation de l'aquifère du Dogger :

- des eaux météoriques, anciennes, correspondant à une période de condition climatique différente, se sont infiltrées lors de la mise en charge de l'aquifère, lessivant des quantités variables de "sels" présentes dans les sédiments, créant ainsi les variations de salinité observées.

STRONTIUM ISOTOPIQUE

Le strontium est fréquemment utilisé dans les études des évolutions chimiques et minéralogiques lors des interprétations des environnements sédimentaires.

Si nous prenons pour référence l'eau de mer, on remarque que les eaux du Dogger sont riches en strontium ($Ca/Sr = 110$; $Ca/Sr = 40$ respectivement).

Le mécanisme d'enrichissement est réglé par des phénomènes de dissolution-précipitation de carbonates (recristallisation, dolomitisation) dû au coefficient de partage calcite-dolomite ou aragonite-calcite.

La composition isotopique du strontium dans les fossiles carbonatés a révélé d'importantes variations du rapport 87/86 Sr du strontium dans l'eau de mer au cours des âges géologiques.

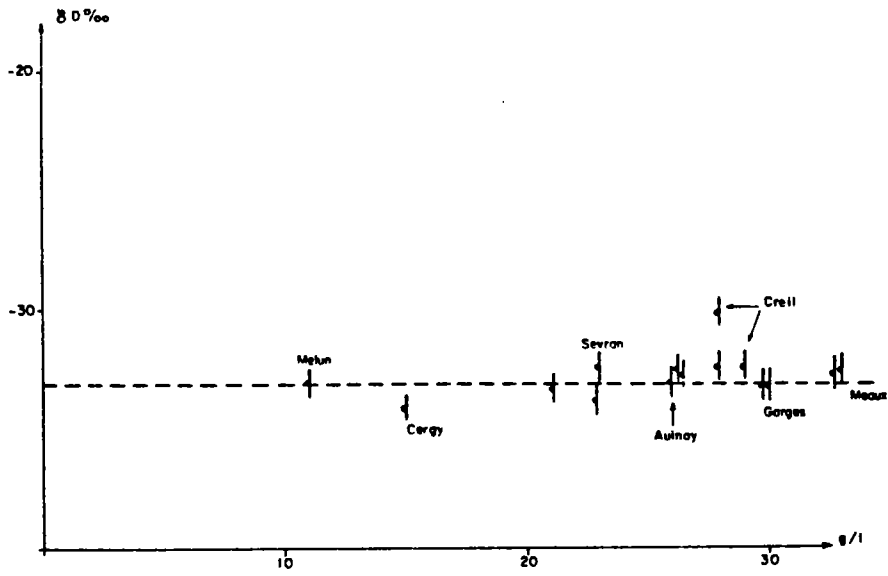


FIGURE 8

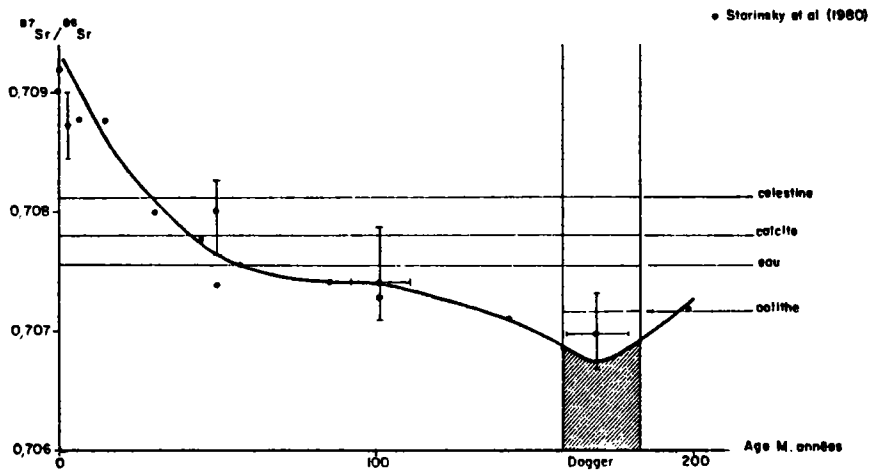


FIGURE 9

Nous avons reporté dans la figure 9 les résultats préliminaires obtenus sur les carbonates des carottes du forage d'Aulnay (oolithe, calcite néoformé, Célestine présente dans une fissure) ainsi que les échantillons d'eaux du Dogger.

Les oolithes qui représentent le matériel fossile diagénétique présentent bien le rapport isotopique correspondant à l'âge de formation du Dogger (≈ 170 million d'années). Par contre les eaux du Dogger possèdent des valeurs nettement supérieures, bien qu'elles soient contenues dans le réservoir oolithique.

Les analyses du Strontium isotopique sur les calcites néoformées ainsi que sur la Célestine, fournissent des valeurs élevées ce qui laisse penser que des phénomènes de dissolution-précipitation se sont produits à une époque beaucoup plus récente, qui pourrait parfaitement correspondre à l'époque de mise en charge de l'aquifère du Dogger.

Il est important de poursuivre une étude détaillée du Strontium isotopique afin de replacer l'histoire de ces eaux dans le contexte du réservoir sédimentaire.

LE SYSTEME SOUFRE

Les eaux du Dogger témoignent d'un environnement réducteur caractérisé par la présence de H_2S . Les premiers résultats montrent que les espèces prépondérantes sont les sulfures (HS^- , S^{2-}) et les mercaptans (sulfures organiques).

Les formes d'oxydation partielle du soufre : thiosulfates, sulfites, sont en très faible concentration et souvent non détectables ($< 10^{-6}$ mole/l). Ces ions métastables jouent un rôle important dans les phénomènes Red-ox et caractérisent le degré d'oxydo-réduction du milieu.

Dans le cas présent, nous sommes donc en présence d'un système H_2S-H_2O .

Les rapports isotopiques du soufre ^{34}S caractérisent les différents environnements géologiques. Les études réalisées sur l'évolution chronostratigraphique du soufre isotopique ont permis de définir une valeur moyenne de + 16 ‰ en ^{34}S du soufre des sulfates des sédiments du Dogger. Les résultats des nombreuses analyses isotopiques des échantillons d'eaux du Dogger montrent que l'ensemble des valeurs est largement supérieur et varie de + 22,4 ‰ pour Meaux à + 48,5 ‰ pour Beauvais. Ce phénomène d'"enrichissement" en soufre ^{34}S par rapport à la valeur moyenne attendue pour le Dogger, témoigne d'une réduction, plus ou moins avancée, des sulfates en sulfures. Des bactéries sulfatoréductrices (du genre Désulfovibrio) sont très probablement à l'origine de ces phénomènes.

Les concentrations en sulfures mesurées sur les différents puits échantillonnés s'étendent de $0,5 \cdot 10^{-5}$ mole/l à Coulommiers jusqu'à $350 \cdot 10^{-5}$ mole/l pour Epernay. Ce domaine de variation est important car les quantités de sulfures produites par le métabolisme des bactéries sont directement liées à l'intensité de la réduction. Il faut noter que divers phénomènes secondaires post-réduction peuvent perturber le rapport $^{34}S_{SO_4}/H_2S$

Précipitation des minéraux sulfurés, redissolution de sulfate etc...

Les analyses bactériologiques faites sur les prélèvements en tête de puits ont montré que l'activité des bactéries sulfato-réductrices est actuellement arrêtée. Si cette réduction bactérienne s'est terminée depuis suffisamment longtemps, le géothermomètre utilisant les isotopes des sulfates devrait être bien corrélé aux températures de l'aquifère. Le temps nécessaire, pour atteindre l'équilibre isotopique entre SO_4 et H_2S est d'au moins 500 ans à $100^\circ C$. Les mesures isotopiques des sulfates nous permettront donc de replacer les phénomènes de réduction dans l'histoire de l'aquifère.

ANALYSES DES GAZ DES FLUIDES DU DOGGER

La baisse de pression qui se produit pendant la montée de l'eau vers la surface provoque la libération des gaz dissous dans le fluide (point de bulle). On mesure à pression atmosphérique, des rapports, volumes de gaz-volumes d'eau (GLR) qui vont de 2 à 17 %.

Les compositions des gaz ainsi libérées sont très variables à dominante parfois azote : Creil, Tremblay ; Méthane : Melun, Fontainebleau jusqu'à 50 % ; où CO_2 : Blanc Mesnil, Meaux. Les teneurs en H_2S parfois non détectables (Meaux, Coulommiers) peuvent atteindre 5 % (en volume) à Epernay.

La connaissance précise de la composition quantitative et qualitative des gaz du fluide du Dogger est primordiale pour recalculer, dans les conditions de fond, les différents équilibres chimiques, qui règlent les espèces en solution.

CONCLUSIONS

Nous avons présenté, dans ce rapport d'avancement, les premiers résultats formant l'ébauche d'un modèle hydrogéochimique de l'aquifère du Dogger.

Les travaux en cours de réalisation (datation $C14$, mesures isotopiques, etc...) qui seront regroupés dans le rapport détaillé, aboutiront à une connaissance approfondie des fluides du Dogger permettant ainsi d'en optimiser leur exploitation.

STRUCTURE THERMIQUE DU RESERVOIR ET DE SON ENVIRONNEMENT

R. Gable

OBJECTIFS

L'objectif est de définir le champ de température (par mesures combinées avec des interpolations et des modèles) en tous points dans le bassin parisien en vue d'une évaluation réaliste de l'environnement et de la structure thermique interne du réservoir.

Pour atteindre cet objectif général on progresse sur trois fronts :

- A - Acquisition des données thermiques en forages incluant pour l'essentiel la collecte directe sous forme numérique des données thermiques sur micro-ordinateur et le traitement de l'information.
- B - Corrélation entre puits et synthèse des résultats.
- C - Modèles de comportement thermique du sous-sol selon des distributions de conductivités thermiques variables.

RESULTATS ACQUIS

1 - ACQUISITION DES DONNEES THERMIQUES

a - Développement des moyens d'investigation en forage notamment par la mise au point d'une chaîne d'acquisition de données thermiques sur micro-ordinateur. Le stockage sur cassette des données thermiques permet une utilisation rapide et souple de l'information.

b - Mise au point de logiciels de traitement de l'information qui permettent le contrôle puis le calcul et le tracé des températures ou de leur dérivée en fonction de la profondeur.

c - Acquisition proprement dite sur différents sites, (forages géothermiques et autres).

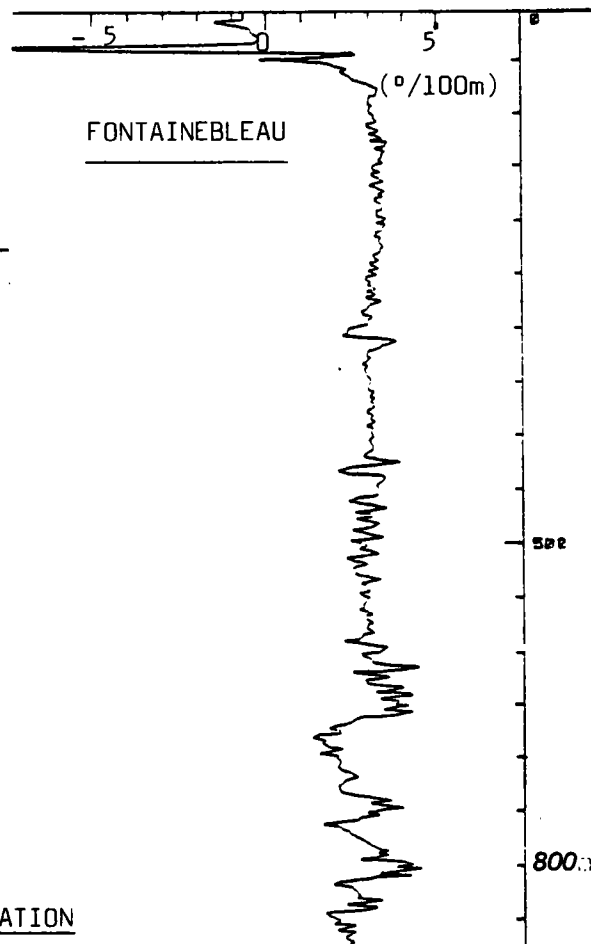
Le profil thermique et le gradient géothermique ont été mesurés en continu dans tous les puits où nous avons pu accéder. Nous sommes intervenus à Evry 1, Epernay 1, Blanc-Mesnil Nord 1 et 2, Reims-Murigny 1, Fontainebleau 1 et 2, Meaux 6...

d - Présentation d'une nouvelle diagraphie thermique pouvant s'intégrer dans l'éventail des diagraphies classiques.

Cette diagraphie est un enregistrement direct des variations du gradient géothermique in-situ. L'extrême sensibilité de notre système d'acquisition apporte des informations exceptionnelles :

- variations verticales rapides du gradient et souvent de fortes amplitudes ;
- corrélations significatives de puits à puits ;
- variations corrélatives avec des diagraphies classiques pour un même puits ;
- chaque unité géologique se distingue par une signature thermique caractéristique.

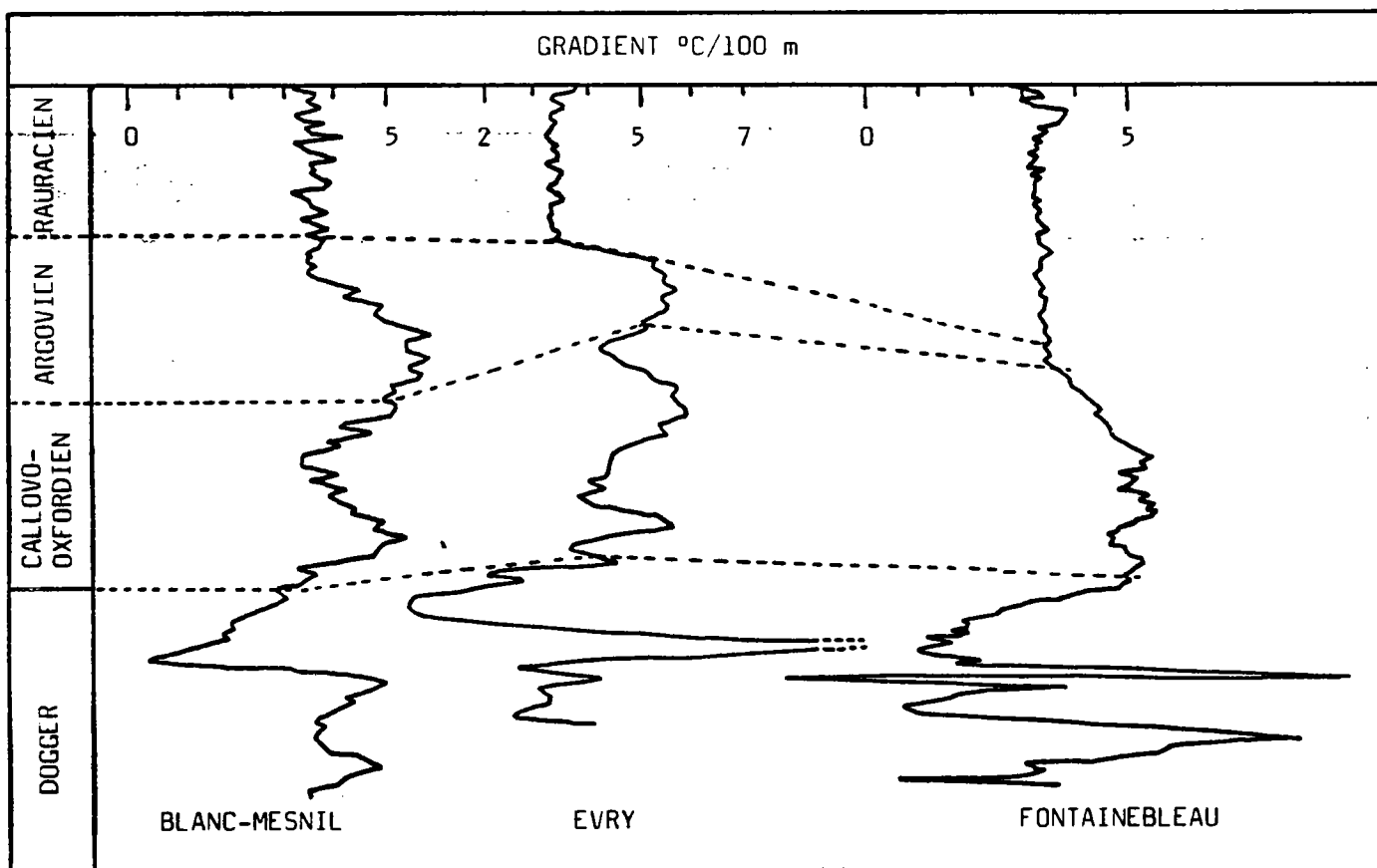
Ce système commence à produire de bons résultats que ce soit en statique (exemple ci-contre) ou en dynamique (test de MURPHY-essais faits sur les puits de Villersexel et Reims). Il reste à perfectionner pour tirer au clair l'effet de filtre que représente le tubage et le ciment, le pouvoir séparateur efficace vrai des dérivées calculées, etc....



2 - CORRELATION, SYNTHESE et INTERPRETATION

a - Une première synthèse des résultats a été réalisée sous la forme de coupes traversant le bassin parisien selon deux directions est-ouest et nord-sud.

Les corrélations thermiques aisément discernables de puits à puits soulignent des discontinuités thermiques relativement simples en ce qui concerne les formations "crétacé" homogènes (excepté sur les bordures du bassin), plus complexes dans les formations jurassiques . Une analyse détaillée est faite de ces variations.

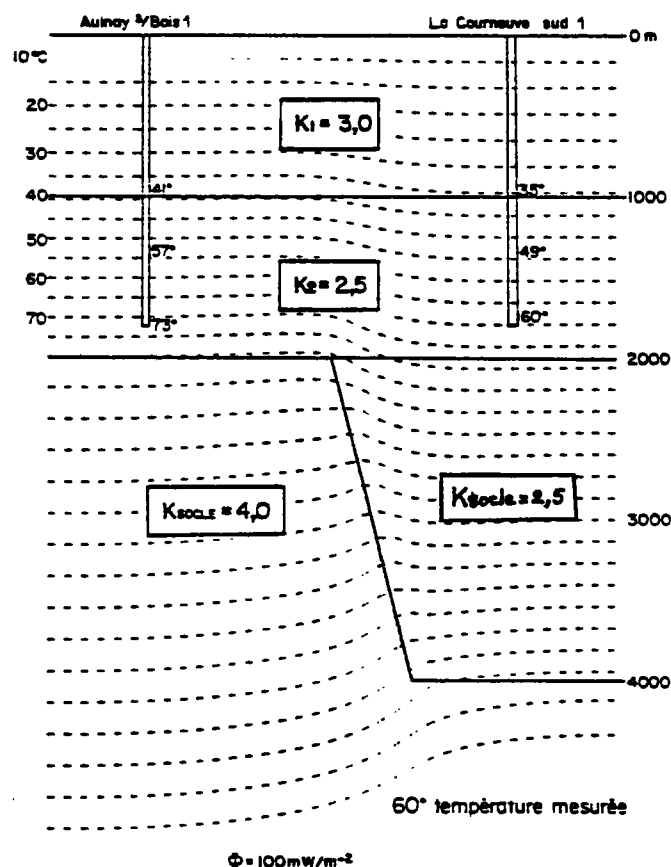


3 - MODELISATION

Deux approches ont été testées.

a - Ebauches de modèles thermiques théoriques bidimensionnels à six couches avec sortie graphique des profils thermiques théoriques aux points de mesures.

L'absence de solutions analytiques simples des modèles bidimensionnels, nous conduit à utiliser une méthode de résolution de l'équation de la chaleur par différences finies. Cette modélisation numérique est utilisée comme support et contrôle de l'interprétation (issue des résultats expérimentaux). Un exemple très schématique est présenté ci-après. Une hétérogénéité importante du socle pourrait rendre compte des variations thermiques importantes entre les puits d'Aulnay et de La Courneuve.



Modèle théorique entre les puits

d'Aulnay et La Courneuve (Bassin parisien).

La modélisation des coupes est-ouest et nord-sud est actuellement en cours. La confrontation entre l'approche théorique et expérimentale doit apporter des éléments d'interprétation.

b - La modélisation géostatistique.

Tout d'abord mise au point et utilisée dans le domaine minier depuis plusieurs années, la géostatistique a été appliquée à différents domaines des Sciences de la Terre : Recherche pétrolière, Hydrogéologie et surtout Météorologie. La théorie repose sur des méthodes qui allient l'aspect déterministe (dérives, tendances) et l'aspect aléatoire (irrégularités, fluctuations) des phénomènes naturels.

Pour nous il s'agit de définir la distribution tridimensionnelle réelle ou probable du champ de température en tous points du bassin. Des contraintes seront imposées au modèle : contraintes thermiques, géologiques, et structurales. Un premier test sur le Bassin parisien est montré à titre d'exemple pour une estimation optimale de la variation de la température à 2000 mètres de profondeur.

L'utilisation de cet outil ne prendra son sens véritable que lorsque nous passerons à des analyses de champ tridimensionnel respectant la variabilité spatiale du champ de température et ses lois physiques, prenant en compte la qualité des données, les caractéristiques horizontales et verticales de la variabilité, la lithologie et l'ordre de grandeur des conductivités thermiques correspondantes, le flux apparent.

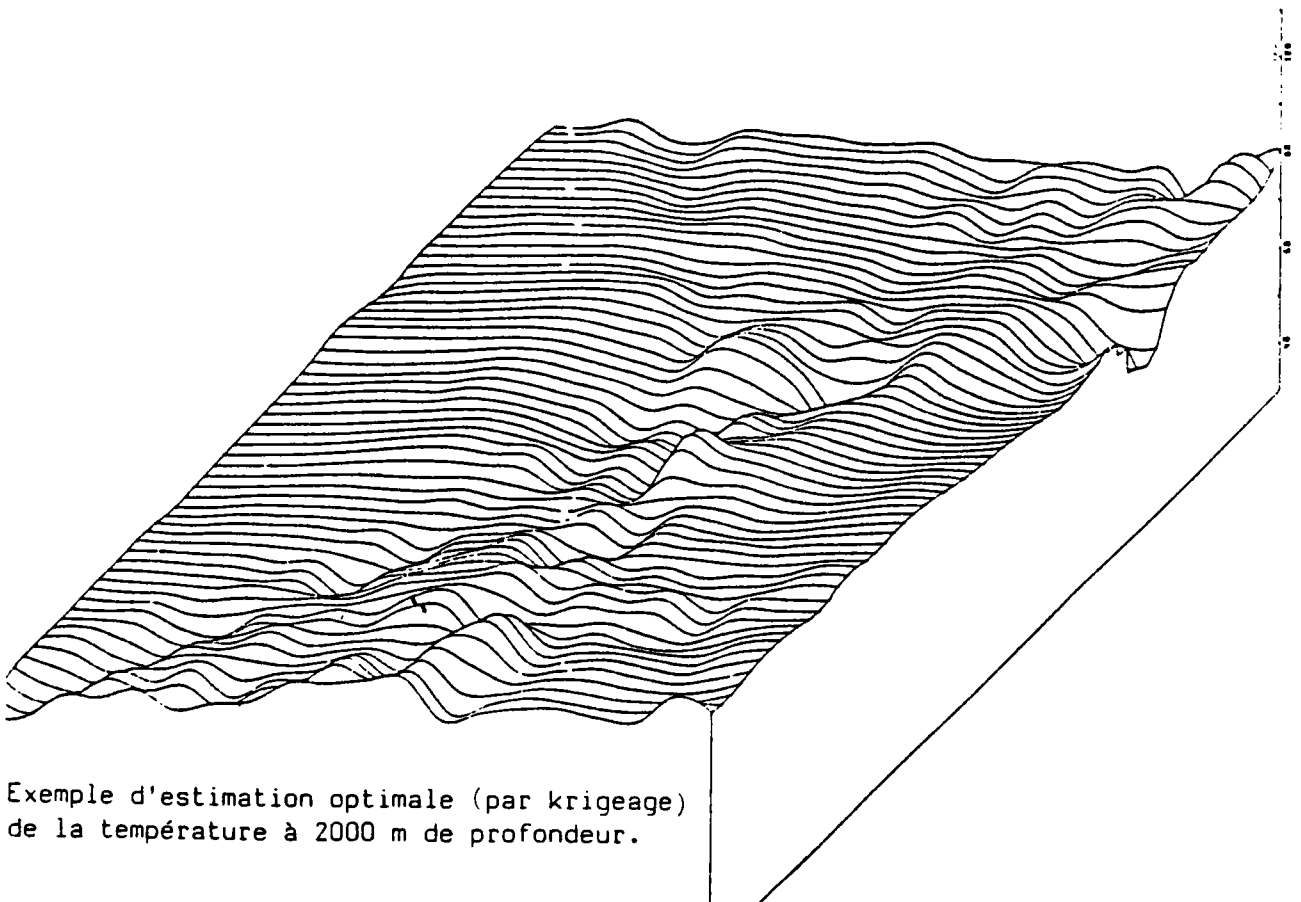
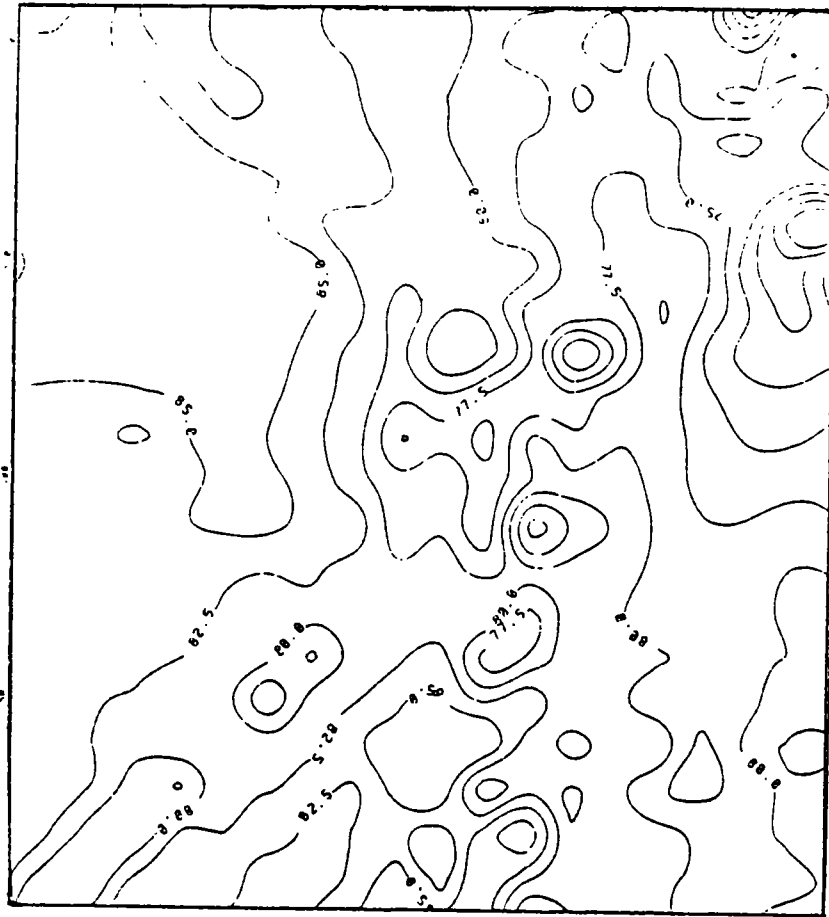
PUBLICATIONS REALISEES

- 1 - "Three Dimensional modelling of a geothermal field" (proceedings of NATO ASI (Advanced Studies Institute).
JP. CHILES - R. GABLE, 1983.

- 2 - "Geothermal investigations in some deep wells in sedimentary basins : temperature disturbances observed and their interpretation".
R. GABLE, 1983.
International Colloquium on thermal phenomena in sedimentary basins -
Saint Médard en Jalles.

- 3 - "Etude thermique du bassin houiller Lorrain : approches théoriques et expérimentale."
Convention de recherche HBL/BRGM, 1982-83) - Etude 83 SGN 440 IRG.

KRIGING GRID LEVEL 2000.



Exemple d'estimation optimale (par krigeage)
de la température à 2000 m de profondeur.

PUBLICATIONS EN COURS :

- 1 - "Une nouvelle approche dans l'acquisition et l'interprétation des paramètres thermiques in-situ (CRAS)"
- 2 - "Approche tridimensionnelle du champ de température d'un bassin sédimentaire (application au Bassin parisien)" (revue thermique spécialisée).
- 3 - "Corrélation et interprétation de diagraphies thermiques nouvelles".
- 4 - "Interprétation de la déformation du champ de température dans un Bassin houiller" (exemple du Bassin Lorrain - Merlebach).

COOPERATION SCIENTIFIQUE :

A - Convention de recherche :

Convention avec l'Institut de Physique du globe de Strasbourg sur le thème transfert thermique en milieu fracturé, (Appui du PIRSEM).

Convention avec l'Université de Bretagne Occidentale (Laboratoire de géophysique interne) sur le thème acquisition, traitement et interprétation de données thermiques.

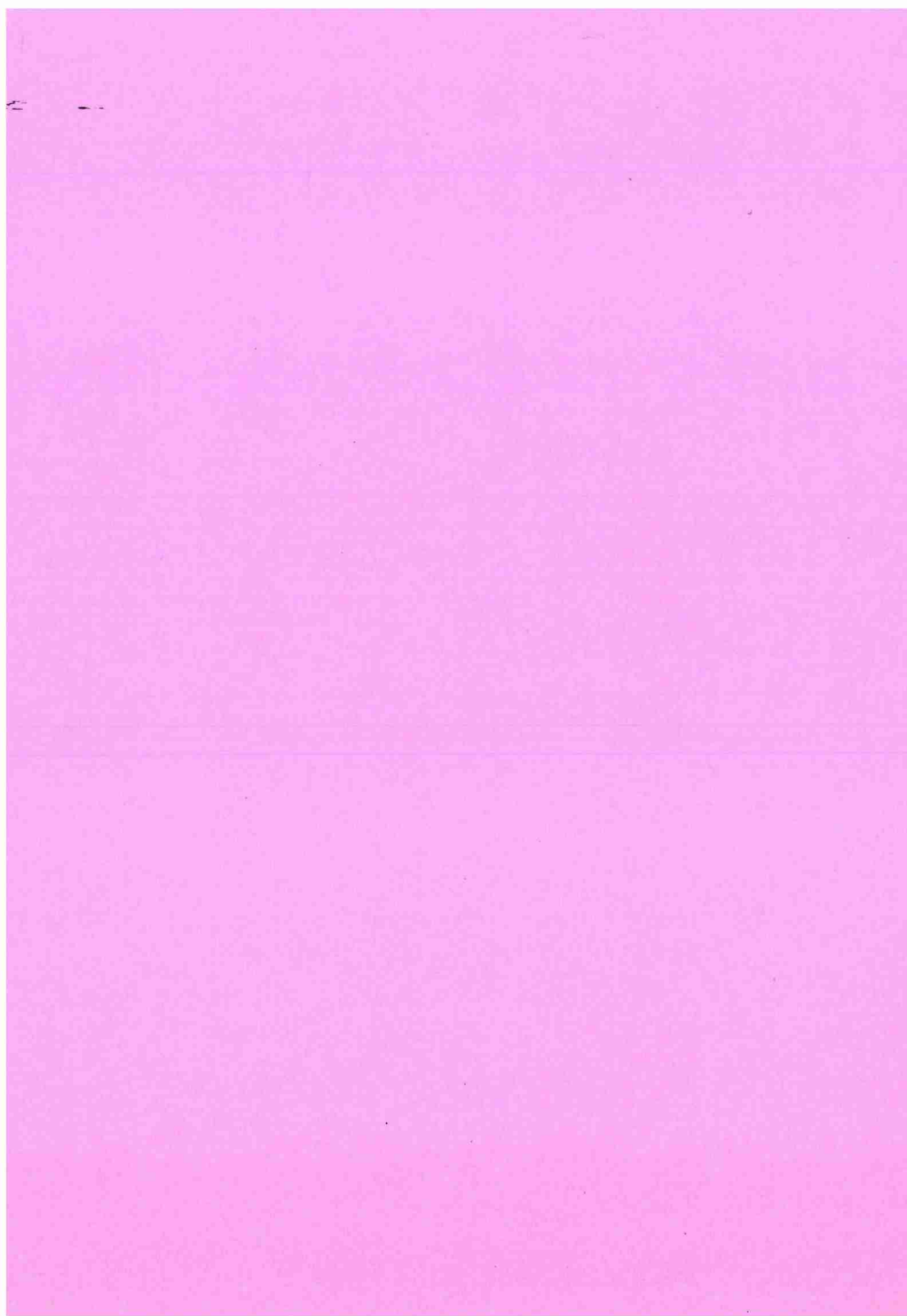
B - Thèses :

Thèse de Doctorat d'Etat : M. BAHY LAHCEN (Appui du PIRSEM)

Thèse de 3ème cycle : Melle B. COLENO

Participent aux travaux de recherches dans les domaines suivants :

- programmes informatiques et modèles thermiques théoriques
P. WATREMEZ
- programmes informatiques et modèles thermiques théoriques, conductifs et convectifs, en milieu fracturé.
Bahy LAHCEN (Thèse Doctorat d'Etat)
- Mise au point d'un modèle tridimensionnel du champ de température (géostatistique).
J.P. CHILES.
- Acquisition des données, élaboration des logiciels d'acquisition, traitement des données, synthèse.
(Thèse 3ème cycle : B. COLENO et J.C. FOUCHER).



EXPLOITATION ET GESTION PAR MODELISATION

A. Menjot - P. Watremez

OBJECTIF ET CONTEXTE DE L'ETUDE

La modélisation de l'exploitation des réservoirs géothermiques appliquée au cas du Dogger du Bassin Parisien a pour objectif principal de contribuer à une meilleure connaissance et à une gestion plus optimale de la ressource.

L'exploitation des calcaires du Dogger par doublets de forages a connu un essor rapide ces cinq dernières années ; ce champ géothermique basse énergie est actuellement reconnu et exploité par 70 forages environ. En fonction des besoins de surface en banlieue parisienne (villes nouvelles), la densité d'implantation des ouvrages est très diverse : on constate de plus en plus fréquemment certaines concentrations locales d'exploitations ou des densités élevées à l'échelle d'un département (cas de la Seine St Denis par exemple).

Cet accroissement de la densité d'implantation des ouvrages géothermiques implique plusieurs conséquences quant à l'approche du comportement du réservoir par modélisation :

- l'existence d'interférences mutuelles entre doublets élémentaires voisins ; tout nouveau projet est ainsi à dimensionner et à localiser en fonction des ouvrages existants ou futurs,
- la caractérisation géométrique et physique du réservoir évolue et se précise en fonction du nombre de forages réalisés. La distribution spatiale des paramètres principaux (épaisseurs, perméabilités, etc) supposée initialement homogène sur la base de données peu nombreuses, apparaît beaucoup plus hétérogène et par conséquent plus délicate à cartographier et à introduire dans les modèles de calcul.
- l'extension du domaine d'étude à considérer pour la modélisation en raison de l'hétérogénéité du milieu et des interférences mutuelles, d'où le recours fréquent à des simulations régionales d'ensemble.

Dans ce contexte, la simulation du comportement du réservoir nécessite l'utilisation d'un modèle régional hétérogène évolutif et la détermination préalable de la distribution des paramètres à partir des données ponctuelles sur forages (modèle géométrique et physique).

MOYENS DE L'ETUDE

L'outil de calcul que constitue le modèle mathématique est pour une large part acquis et maîtrisé. Son application pratique, par contre, est essentiellement conditionnée par le volume, la densité, et la fiabilité des données acquises in situ ; d'où l'approche simplifiée par modèle homogène utilisée jusqu'à présent.

Afin d'apprécier une méthodologie générale d'approche, dans un premier temps, une zone d'étude test a été sélectionnée en raison de la densité des ouvrages réalisés et des analyses locales plus fines en cours (thermométrie, géochimie, corrélations stratigraphiques, géologie). Il s'agit du Dogger de la Seine St Denis reconnu par 22 forages géothermiques.

La définition du modèle physique caractérisé par la géométrie de l'aquifère et ses paramètres hydrodynamiques est abordée en utilisant l'outil géostatistique. Il s'agit d'une méthode fort intéressante, parmi d'autres, permettant d'accéder à une distribution régionale des paramètres, complétée par un indicateur de fiabilité, en tout point d'un domaine sur la base d'un certain nombre de données ponctuelles.

RESUME DES TRAVAUX ET RESULTATS ACQUIS

* Modèle mathématique :

Le modèle mathématique utilisé est un modèle numérique (différences finies) fournissant la distribution des variables pression et température à l'intérieur d'un domaine subdivisé en mailles carrées de taille variable. Dans la version actuelle on distingue 4 ordres de maille (modèle bidimensionnel). Chaque augmentation de l'ordre correspond à une subdivision par 9 (soit 3×3) de la maille de départ. Le découpage maximal d'une maille d'ordre 1, pratiqué essentiellement au voisinage des forages, est ainsi de $1/729$ (résolution géométrique minimale). Les paramètres du réservoir sont imposés au centre de chaque maille.

Selon une procédure classique, le modèle détermine tout d'abord l'écoulement du fluide dû aux forages et aux charges imposées à l'intérieur de l'aquifère assimilé à un monocouche d'épaisseur et de perméabilité variables. Lorsque le schéma d'écoulement global est déterminé, le calcul thermique est effectué pour chaque tube de courant dans une zone choisie, ou dans l'ensemble du domaine. Les épontes participant au réchauffement des eaux injectées sont supposées d'extension infinies. Les sorties du modèle sont composées des résultats suivants :

- carte des pressions et flux hydrauliques aux limites,
- distribution des lignes de courant avec quantification des temps de transfert thermiques le long de chacune d'elles,
- carte des isothermes à différent temps,
- évolution des températures aux forages de production.

* Modèle géométrique :

Le domaine d'étude rectangulaire s'étend sur 24 km dans le sens Ouest-Est, et sur 16 km dans le sens Nord-Sud ; il recouvre la partie nord de l'Ile de France et la quasi totalité du département de la Seine St Denis. Le modèle est bidimensionnel plan avec intégration selon la verticale.

En plan, le réseau de calcul comporte de l'ordre de 15000 mailles réparties en mailles d'ordre 1 (1000 m de côté) jusqu'à l'ordre 4 (37 m de côté). Les mailles kilométriques de base coïncident avec le quadrillage Lambert de référence utilisé pour l'implantation des forages. La topologie de ce maillage, et le choix des tailles de maille, complexes à contrôler manuellement, sont générés automatiquement par programme à partir d'un nombre réduit d'informations (fichier des forages).

Selon la verticale, l'intégration est définie à partir de l'analyse des diagraphies et des profils-flowmètre obtenus en production. La structure particulière des horizons producteurs est caractérisée par l'existence d'un grand nombre de couches (6 à 12 environ) d'épaisseur et de débit variables. Pour cette première analyse on a tout d'abord déterminé la cote moyenne (NGF) barycentrique des couches productrices, puis cumulé les épaisseurs productives autour de cette référence pour chaque puits, avant régionalisation. Le concept d'épaisseur cumulée totale utilisé ne constitue qu'une première approche qui devra par la suite être corrigée sur la base des études plus fondamentales en cours.

* Modèle physique :

Le modèle physique concerne la distribution spatiale des 5 paramètres nécessaires aux calculs, et analysés à l'aide de l'outil géostatistique :

- la cote (NGF) barycentrique des niveaux producteurs, ZG
- l'épaisseur productive cumulée, h
- la perméabilité, k
- la transmissivité intrinsèque, kh
- la température moyenne du réservoir T_0 .

Utilisation de la méthode géostatistique

Une variable régionalisée est une variable Z qui se déploie dans l'espace plus ou moins régulièrement, mais en montrant une certaine structure. La teneur pour un gisement, la perméabilité d'un aquifère sont des exemples de variables régionalisées. La géostatistique est l'application de la théorie des variables régionalisées établie par M. MATHERON (1965). Disposant d'un échantillonnage de valeurs de Z en certains points x_i , on cherche à estimer au mieux cette grandeur dans l'espace en tenant compte des valeurs $Z(x_i)$ expérimentales. La démarche se décompose en deux étapes principales :

- tout d'abord l'analyse de la structure des données, traduite par le variogramme : il s'agit en quelque sorte d'une fonction de corrélation entre le point x et le point $x + h$. Le variogramme précise la notion de zone d'influence d'un échantillon, notamment par la "portée" qui est la distance au-delà de laquelle $Z(x)$ et $Z(x + h)$ sont sans aucune corrélation. Le comportement à l'origine renseigne sur la continuité, la régularité ou la variabilité du paramètre étudié.
- Le krigeage ensuite, ajusté au modèle de variogramme, est la technique d'interpolation et d'estimation de la variable régionalisée aux noeuds d'un réseau maillé.

Les avantages principaux de la méthode sont la rapidité de l'analyse et le caractère systématique de l'approche surtout lorsque le nombre de points devient important. Il est certain que cette approche n'intègre pas autant de phénomènes que peut le faire un cartographe expérimenté ; par contre il convient de noter que la finalité principale de la méthode employée n'est pas actuellement d'obtenir une cartographie précise de la ressource, mais seulement de fournir les données nécessaires au modèle de simulation. Cette méthode offre enfin un avantage non négligeable, qui n'est pas disponible en cartographie : la distribution des variances de l'erreur d'estimation introduite.

L'examen des variogrammes et des cartes obtenus à l'aide du programme BLUEPACK (mis au point à l'Ecole des Mines de Paris) montre que les variables considérées : k , h , kh , T_0 , etc... n'ont pas le même comportement, et qu'en général il est assez difficile de réaliser une très bonne interpolation en raison principalement du nombre de points et de sa distribution dans le domaine d'étude.

Epaisseur cumulée, h :

Le variogramme obtenu est irrégulier et l'on observe un effet de "pépité" traduisant un comportement assez chaotique. Le variogramme retenu est sphérique avec effet de pépité ; la portée de 4 km, assez faible, se traduit sur les cartes par des zones d'influence autour des puits, individualisées et délimitées par des courbes d'isovaleur fermées.

Perméabilité, k :

Le variogramme de type sphérique, traduit le même comportement que pour la variable h , l'hétérogénéité est importante.

Transmissivité intrinsèque, kh :

L'analyse met en évidence une dérive linéaire se traduisant par une décroissance NE-SO de la transmissivité. Après déduction de l'effet de la dérive, le variogramme ajusté est un modèle sphérique avec une portée de l'ordre de 4,5 km.

Température du réservoir, T_0

Comme pour la variable transmissivité on constate une dérive linéaire NE-SO. Le variogramme de la température moyenne de production est le plus régulier des variogrammes expérimentaux. Le faible effet de pépité constaté correspond sans doute aux erreurs entâchant les données : la température moyenne de l'aquifère est en effet mesurée en débit au sabot du casing et peut donc être légèrement perturbée.

CONCLUSIONS

La méthode géostatistique testée dans cette étude se révèle particulièrement utile et intéressante quant aux informations d'ordre statistique fournies sur la structure des données. Utilisée pour résoudre des problèmes similaires dans le domaine minier ou du stockage de gaz en aquifère, cette technique n'avait encore jamais été utilisée en géothermie.

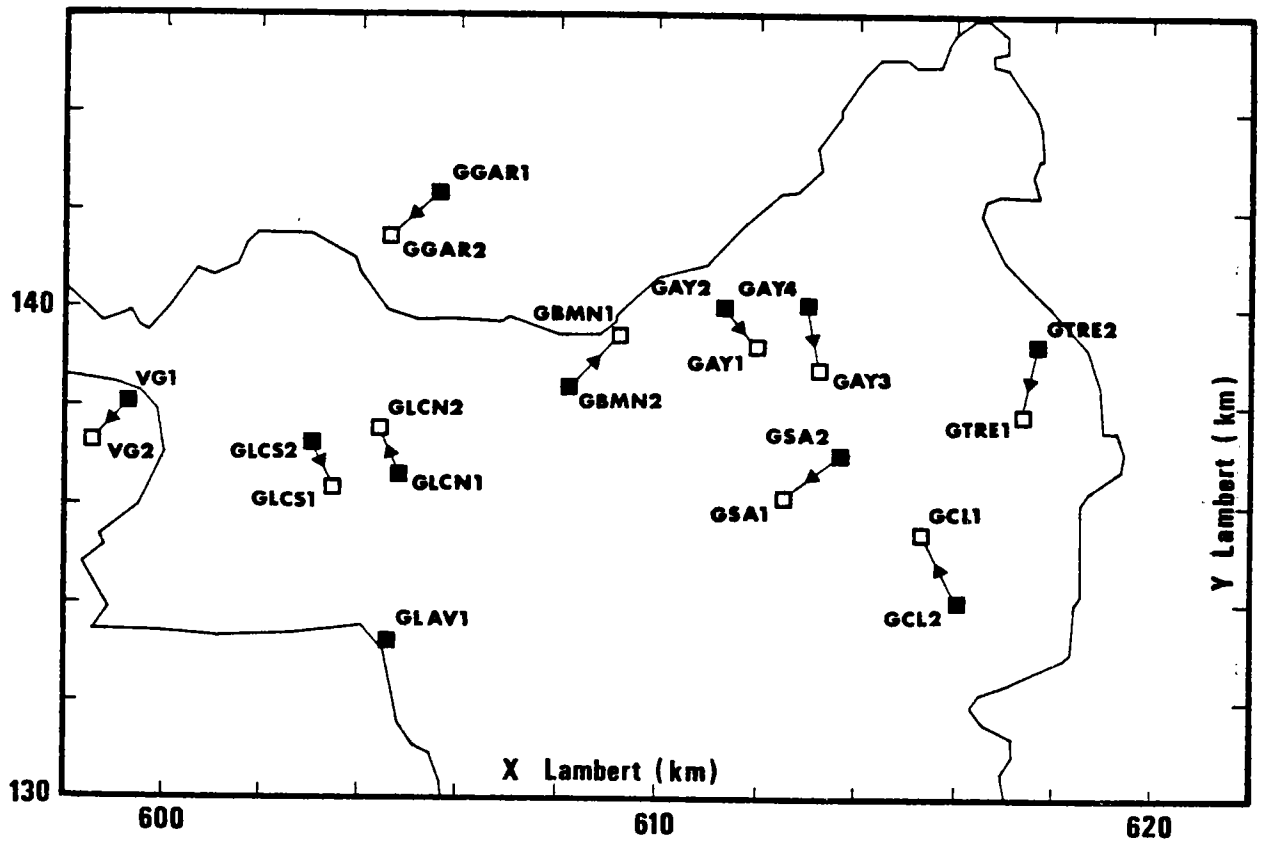
L'exploitation de la méthode est parfaitement adaptée aux modèles numériques de simulation par réseaux maillés : les paramètres régionalisés à introduire sont obtenus directement par transfert de fichiers informatiques, ce qui évite notamment la digitalisation de cartes.

Le modèle hétérogène régional de gestion du réservoir appliqué au Dogger de la Seine St Denis permet une estimation plus précise du comportement des doublets géothermiques ainsi qu'une prévision plus fiable des performances des ouvrages en projet, en tenant compte de l'hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques. La conception de la chaîne de programmes permet enfin la gestion dynamique d'un réservoir dans la mesure où toute nouvelle information peut être introduite comme une perturbation à effet local, sans remettre en cause la structure générale des données et des résultats acquis.

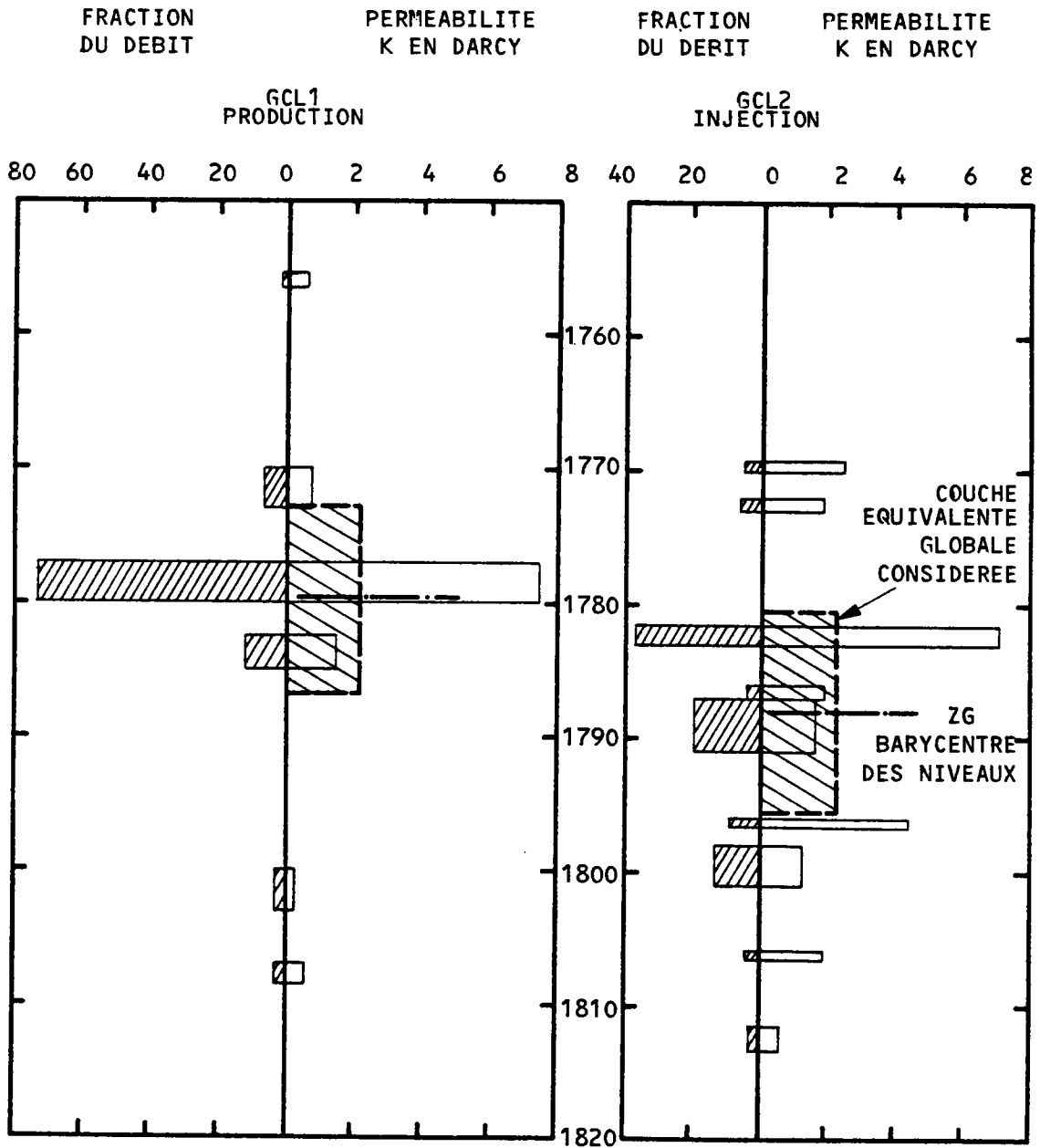
Dans le domaine de la connaissance du réservoir, cette analyse met en évidence, pour chaque paramètre, des structures hétérogènes dans le plan des couches productrices ; cette hypothèse de travail actuelle devra par la suite être analysée plus en détail à l'aide d'autres informations complémentaires (géologie, thermique, géochimie). Le faible nombre de forages conduit à une estimation régionale assez grossière, surtout pour les variables épaisseur productive et perméabilité ; mais toute l'information existante a été exploitée. On peut actuellement en déduire deux résultats principaux :

- la mise en évidence de la faible portée des variogrammes, ce qui montre la difficulté des prévisions (ressources) pour la conception des projets dont l'implantation est éloignée des doublets existants,
- l'existence de dérives régionales pour la transmissivité et la température avec confirmation de l'axe NE-SO.

L'interprétation de la structure des paramètres permet enfin de se faire une idée moins schématique du milieu exploité : le concept initial de "réservoir homogène" a progressivement évolué vers une représentation stratifiée en plusieurs couches supposées continues, mises en évidence par l'emploi systématique des profils-flowmètre. Les premiers résultats obtenus permettent d'envisager une nouvelle représentation du milieu, plus complexe, caractérisée par la juxtaposition de sous-structures continues avec communications entre elles. La confirmation de cette hypothèse pourrait conduire à envisager l'utilisation d'un modèle de réservoir tridimensionnel incluant notamment les données géochimiques.



Modèle régional hétérogène de la Seine St Denis.
Domaine d'étude et implantation des forages existants dans le réservoir.



METHODE DE TRAITEMENT DES PROFILS-FLOWMETRE POUR L'INTEGRATION DES NIVEAUX PRODUCTEURS SELON LA VERTICALE AVANT REGIONALISATION PAR GEOSTATISTIQUE (Hypothèse d'un cumul au taux de 100 %).

CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'IMRG

DU 22 NOVEMBRE 1983

PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES EN 1983

(Salle DSGM-9H30)

Participeront à cette Journée, outre les membres du Conseil Scientifique, les chercheurs de l'IMRG directement impliqués dans la réalisation des programmes et quelques chercheurs externes ayant effectivement participé aux recherches de l'IMRG.

Sont également invités des représentants des missions scientifiques respectives de l'A.F.M.E. et du B.R.G.M.

PROGRAMME DE LA SEANCE

9h 30 - 9h 45

INTRODUCTION : J. GOGUEL

Adoption du procès verbal de la dernière séance.

9h 45 - 10h 30

CIBLES GEOTHERMIQUES NOUVELLES

Rapporteur : C. FOUILLAC

1er exposé : JP. CAUTRU

Le Lusitanien

Durée 10 mn.

2ème exposé : A. GERARD

La cible de Haguenau.

Durée 5 mn.

3ème exposé : C. FOUILLAC

Etude géochimique du Sud-Lorraine.

Durée 5 mn.

4ème exposé : C. FOUILLAC et Cl. MEGNIEN

Etude de la région du Cézallier.

Durée 10 mn.

10 h 30 - 11 h

EXPLOITATION GEOTHERMIQUE PAR ECHANGE DIRECT.

Rapporteur : A. BOISDET

1er exposé : A. BOISDET

Ressources moyenne énergie dans le monde.
Durée 5 mn.

2ème exposé : JL. HONEGGER

Centrales à échange direct.

11 h - 11 h 15

..... PAUSE

11 h 15 - 12 h

METHODOLOGIE DE L'EXPLORATION HAUTE ENERGIE.

Rapporteur : A. BEAUCE

1er exposé : A. BEAUCE

Géophysique - Ecoute sismique.
Durée 5 mn.

2ème exposé : V. BARTHES

Géophysique - Magnétotellurique par triples stations
synchrones.
Durée 10 mn.

3ème exposé : Y. BENDERITTER

Approche géophysique des milieux de couverture
Durée 5 mn.

4ème exposé : D. WESTERCAMP

Volcanologie - Evolutions thermiques - tectonique et
hydrothermales des champs géothermiques.
Durée 5 mn.

5ème exposé : C. FOUILLAC

Géochimie appliquée à l'exploration haute énergie.
Durée 10 mn.

12 h - 12 h 30

STOCKAGE ET POMPES A CHALEUR.

Rapporteur : A. MENJOZ

1er exposé : A. MENJOZ

Exploitation des formations superficielles.
Durée 10 mn.

2ème exposé : A. BOISDET

Stockage moyenne température - moyenne profondeur.
Durée 10 mn.

12 h 30 - 13 h 30

..... REPAS

13 h 30 - 14 h 30

PROBLEMES POSES PAR L'EXPLOITATION DU TRIAS

Rapporteur : A. BOISDET

1er exposé : A. BOISDET

Expériences à Melleray - Corrosion - Percolations.
Durée 10 mn.

2ème exposé : C. FOUILLAC

Géochimie et développement de particules au regard des
conditions thermodynamiques.
Durée 10 mn.

3ème exposé : JP. CAUTRU

Géologie et structure des réservoirs triasiques argilo-
gréseux.
Durée 10 mn.

4ème exposé : A. MENJOZ

Circuit géothermique et comportement du réservoir en
injection.
Durée 10 mn.

14 h 30 - 15 h 30

ETUDE DETAILLEE DU RESERVOIR DU DOGGER.

Rapporteur : J. ROJAS

1er exposé : J. ROJAS

Structure sédimentologique du réservoir.
Durée 10 mn.

2ème exposé : C. FOUILLAC

Structure géochimique du réservoir.
Durée 10 mn.

3ème exposé : R. GABLE

Structure thermique du réservoir et de son environnement.
Durée 15 mn.

4ème exposé : A. MENJOZ

Modélisation du réservoir.
Durée 10 mn.

Les Résultats du programme "ECHANGEURS ARTIFICIELS PAR FRACTURATION" ayant été
largement présentés le 19 octobre devant le Comité d'Experts de l'A.F.M.E. ne
feront pas l'objet d'une présentation particulière le 22 novembre.

15 h 30 - 16 h 00 SYNTHESE : J. GOGUEL

Diffusion :

Pour attribution :

- Membres du Conseil Scientifique de l'IMRG
- J. VARET
- Chercheurs IMRG.

Pour information :

- B. DESSUS (AFME)
- Ph. CHARTIER (AFME)
- C. GUILLEMIN (Mission scientifique du BRGM)
- H. DE LA ROCHE (BRGM)

INSTITUT MIXTE DE RECHERCHES GEOTHERMIQUES

PREMIERS RESULTATS OBTENUS AU 15 NOVEMBRE 1983

I - PRESENTATION

Les fascicules qui suivent présentent un premier bilan sommaires des premiers mois d'activité de l'I.M.R.G. On verra que les sujets principaux abordés ont diversement progressé, selon que les travaux ont débuté plus ou moins tôt avec des moyens progressivement mis en place et dont le déploiement n'est encore pas totalement achevé puisque le plan de "montée en charge" de l'I.M.R.G. ne prévoit d'atteindre un rythme de "croisière" qu'à partir du dernier trimestre 1983.

Les premiers résultats acquis sont, pour l'essentiel, le fait des chercheurs qui ont commencé depuis quelques mois à travailler directement dans le groupe qui constitue le noyau actuel de l'I.M.R.G. Cependant, en recherchant une coordination d'autres organismes (tels que le PIRSEM ou la Mission Scientifique du BRGM), l'Institut Mixte de Recherches Géothermiques a mis en place des collaborations prometteuses avec divers laboratoires universitaires ou CNRS et d'autres unités du B.R.G.M. Les premiers effets bénéfiques devraient en être évidents dès la fin de l'année 1983.

Cependant, d'ores et déjà la quantité de travaux en cours et le nombre des résultats acquis nous ont conduit à résumer fortement et le lecteur qui souhaiterait avoir davantage d'informations pourra entrer en contact direct avec le présentateur de chaque sujet ou se référer à notre compte rendu d'activité annuel 1983 dont l'édition est programmée pour le début de 1984.

Bien entendu, d'autres moyens d'information seront utilisés et en particulier l'édition trimestrielle de "Géothermie actualité". Les résultats particulièrement importants pouvant faire l'objet d'une diffusion internationale par l'intermédiaire des revues.

Les six fascicules qui constituent ce recueil présentent un premier bilan de l'activité (sur un peu plus des trois premiers trimestres de l'année) pour six des sept sujets d'activité de l'IMRG.

Le septième "Echangeurs artificiels par fracturation" ne leur a pas été joint, ces résultats ayant été largement présentés le 19 Octobre devant le Comité d'Experts de l'A.F.M.E.

LE PROGRAMME DE RECHERCHE ET SES ENJEUX

<i>SECTEUR</i>	<i>DOMAINE</i>	<i>Programme de recherche 1983-1984</i>	<i>Cible actuelle (1983-1984)</i>	<i>Enjeu</i>	<i>Horizon</i>
GEOthermie TRADITIONNELLE	BASSE TEMPERATURE $\theta < 100^{\circ}\text{C}$	Etude détaillée de réservoirs	Dogger Bassin Parisien	1 MTEP	1985-90
		Exploitation des réservoirs gréseux (injectivité)	Trias profond	1 à 2 MTEP	1990-2000
		Aquifères nouveaux	Lusitanien	1 à 2 MTEP	1990-2000
	MOYENNE TEMPERATURE $80^{\circ}\text{C} < \theta < 180^{\circ}\text{C}$	Cibles nouvelles en socles fracturés	Cezallier Sud-Lorraine	Démonstration Exportation 100 MF/an	1990-2000
		Minicentrales à fluide binaire	Echange direct	Exportation 100 à 500 MF/an	1990-2000
	HAUTE TEMPERATURE $\theta > 150^{\circ}\text{C}$	Méthodologie de l'exploration	DOM-TOM	4 x 60MW	1990
			Exportation de Services	100 MF/an	
		Nouveaux objectifs	Suivi fract.artificielle	?	2000
	Projets métropolitains	Nord Alsace - Mont Dore	Démonstration	1985-1990	
UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE	STOCKAGE DE CHALEUR	Etude comparative des méthodes et pilote moyenne température - moyenne profondeur.	Aquifère à 500 m-1000 m + U.I.O.M. Puissance 5 à 15 MW	1 à 3 MTEP	1990
	POMPES A CHALEUR SUR NAPPES	Nouveaux échangeurs Modèles de gestion.	Sols et nappes superficielles	2 à 4 MTEP	1985-1990