

A.F.M.E.

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE**
Délégation Régionale d'Ile-de-France

**EXAMEN DES OPÉRATIONS GÉOTHERMIQUES
D'ILE-DE-FRANCE**

PARTIE SOUS-SOL

Aulnay-sous-Bois

Rose des Vents

(Seine-Saint-Denis)

Gilbert BRETTE

88 SGN 513 DIG

SOMMAIRE

Introduction :

1 - Situation géographique du doublet	p.	5
2 - Réalisation des forages.....	p.	5
3 - Importance des zones productives.....	p.	8
4 - Description des installations de la boucle géothermale....	p.	10
5 - Observations sur le fonctionnement des installations de la boucle géothermale.....	p.	15
5.1 - Mise en service.....	p.	15
5.2 - Principaux incidents de fonctionnement.....	p.	15
6 - Examen de l'évolution des débits.....	p.	19
6.1 - Evolution du puits d'injection.....	p.	20
6.2 - Evolution du puits d'exhaure.....	p.	21
7 - Etat des forages.....	p.	23
7.1 - Auscultation du puits d'injection.....	p.	23
7.2 - Auscultation du puits de production.....	p.	26
8 - Caractéristiques chimiques du fluide géothermal.....	p.	27
9 - Restauration des ouvrages.....	p.	27
10 - Energie géothermale produite.....	p.	31
11 - Comptes d'exploitation provisionnels de la boucle géothermale.....	p.	33
Conclusion.....	p.	39

LISTE DES FIGURES

1 - Plan de situation.....	p.	4
2 - Coupe géologique et technique du puits de production....	p.	6
3 - Coupe géologique et technique du puits de d'injection...	p.	7
4 - Répartition des niveaux producteurs sur les 2 forages...	p.	9
5 - Schéma de principe de la boucle géothermale.....	p.	13
5bis) - Schéma de principe de la boucle géothermale.....	p.	14
Schéma prévisionnel des têtes de puits.		
6 - Courbes caractéristiques des puits producteur et injecteur	p.	22

LISTE DES TABLEAUX

1 - Caractéristiques hydrogéologiques.....	p.	11
2 - Caractéristiques des niveaux productifs.....	p.	12
3 - Forage d'injection, diagraphies de Mars 1985, calcul des pertes de charges par section.....	p.	25
4 - Analyse d'eau du 30/04/1981. Fin de foration.....	p.	28
5 - Analyse d'eau du 21/08/1986.....	p.	29
6 - Couverture géothermique.....	p.	32
7 - Compte d'exploitation prévisionnel. Hypothèse optimiste.	p.	36
8 - Compte d'exploitation prévisionnel. Hypothèse pessimiste	p.	38

INTRODUCTION

Le présent document s'inscrit dans le cadre de l'audit sur les situations techniques et économiques des opérations géothermiques du Bassin Parisien.

Il analyse le fonctionnement actuel de la boucle géothermale et après avoir fait certaines hypothèses de fonctionnement futur, définit certains coûts à intégrer dans le compte d'exploitation prévisionnel de l'opération.

L'énergie géothermale est ici exploitée par un seul doublet, appartenant au "Logement Français", rue Baudry à Paris. L'exploitant de chauffage est la Compagnie Générale de chauffe.

1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DU DOUBLET

Le doublet de forages est situé sur la commune d'Aulnay-sous-Bois (Seine-Saint-Denis) - cf. figure 1). La plate-forme est implantée sur le terre-plein central d'une voie rapide (rue P.Cezanne).

L'espace laissé libre autour de la plate-forme est actuellement suffisant pour les manoeuvres d'un chantier de réhabilitation.

Le doublet dessert environ 3500 équivalents-logements du quartier "Rose des Vents" à Aulnay, auxquels s'ajoutent environ 2100 équivalents-logements au Sud, raccordés en 1984.

D'autres doublets existent à proximité : Aulnay-Gros-Saule, Sevran, Blanc-Mesnil, La Courneuve Nord et Sud, Bondy (cf. cartouche en figure 1).

2 - REALISATION DES FORAGES

Les travaux de forage se sont achevés en Juillet 1981. L'opération d'Aulnay Rose des Vents compte donc parmi les plus "anciennes" opérations géothermiques d'Ile de France.

Le doublet comprend ici un forage vertical, de production, et un forage, dévié, d'injection, réalisés à partir de la même plate-forme (cf. figure 2 et 3).

Les travaux concernant le sous-sol ont eu le BRGM comme Maître d'Oeuvre.

La réalisation des forages appelle les commentaires suivants :

- . tous les tubes en contact avec le fluide géothermal sont en acier ordinaire K 55.
- . la déviation est forte, sur le puits d'injection (maximum = 59°). Cette déviation prononcée est susceptible de gêner les manoeuvres pendant les réhabilitations.

Coupe géologique et technique résumée - Opérations annexes

GAY - 1

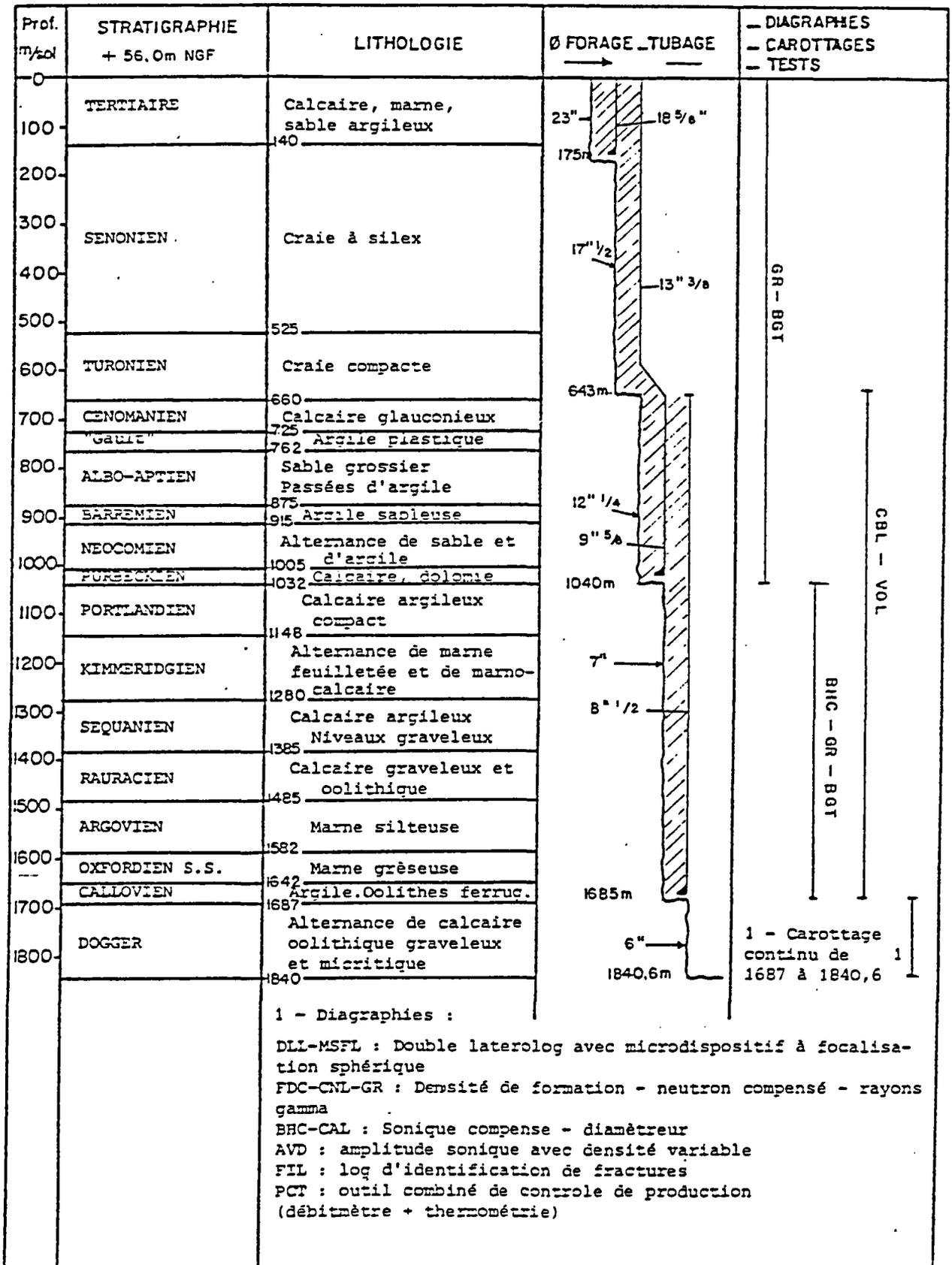


Figure 2 Document BRGM

Coupe géologique et technique résumée - Opérations annexes

AULNAY-SOUS-BOIS N° 2

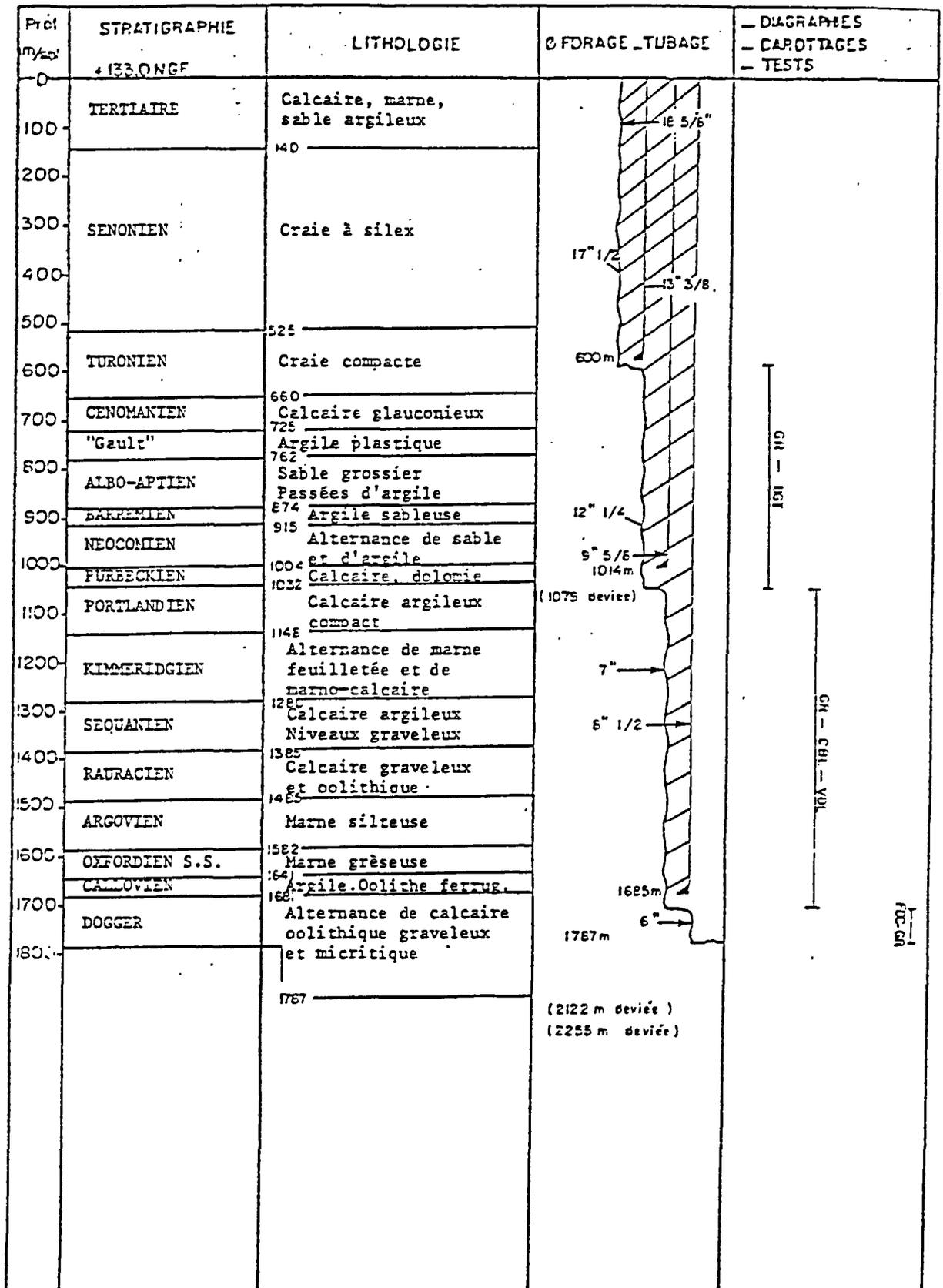


Figure 3 Document BRGM

- . les aquifères superficiels (Quaternaire à Craie Sénonienne) sont protégés par un triple tubage cimenté au forage d'injection. Au forage de production, seul le Tertiaire et le sommet de la Craie sont protégés par un double-tubage.
Sur aucun des forages, la qualité de la cimentation n'a été vérifiée en face de ces horizons (pas de CBL faits).
- . sur les 2 ouvrages, l'aquifère d'eau douce de l'Albien-Néocomien est protégé par un double tubage cimenté. Mais un CBL en face de cet aquifère n'a été réalisé qu'au puits producteur.
- . la foration du Dogger s'est faite entièrement en carottage, au puits producteur, de façon à préciser la lithologie et la position des niveaux producteurs. Sur les 2 forages, le Dogger a été foré en petit diamètre 6".
- . sur les 2 forages, les casings sont en petit diamètre (7") : les pertes de charge y sont plus rapidement décelables et les éventuels rechemisages plus problématiques.

3 - IMPORTANCE DES ZONES PRODUCTIVES

Les caractéristiques hydrogéologiques sont résumées au tableau 1.

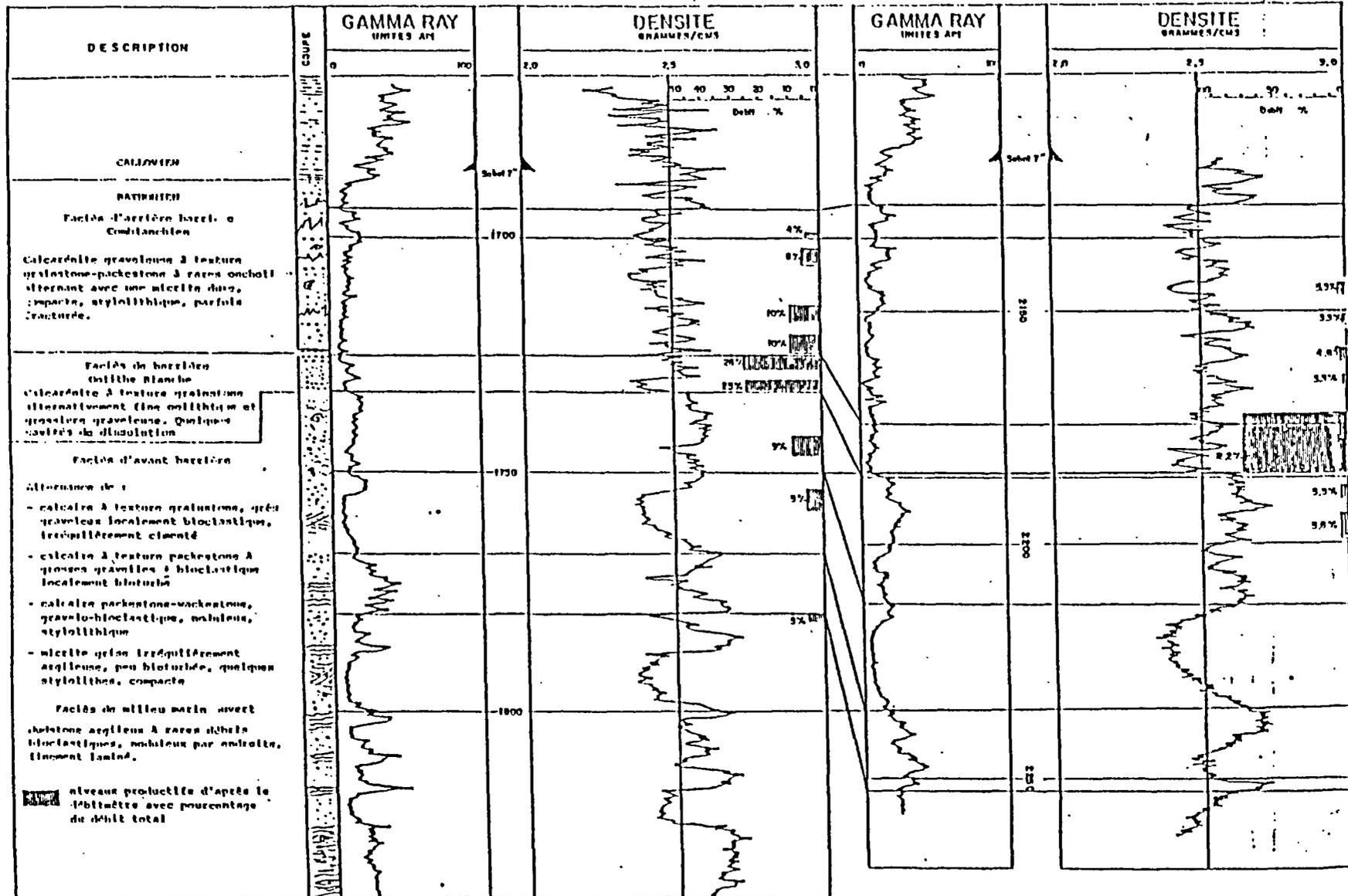
On note que :

- . le toit du Dogger passe ici à une pente plus réduite (2m/km) et se trouve à une profondeur moindre que prévue.
- . la température de fond reste élevée (près de 72°C). Le carottage a montré la présence de zones très fracturées avec même des fractures ouvertes agrandies par des phénomènes de dissolution, ce qui pourrait expliquer la température élevée.
- . les transmissivités sont modérées.

CORRELATION LITHOLOGIQUE ET DIAGRAPHIQUE DU DOGGER ENTRE

GAY 1

GAY 2



Répartition des niveaux producteurs
sur les deux forages
Figure 4 Document BRGM

- . l'épaisseur productivité paraît importante (près de 25m). En fait, 51% du débit sont assurés sur 4.5m seulement au forage de production et 72% par une couche de 8m au forage d'injection (cf. figure 4 et tableau 2).

4 - DESCRIPTION DES INSTALLATIONS DE LA BOUCLE GEOTHERMALE

La boucle géothermale comprend (cf. figures 5 et 5bis) :

- . une pompe électrique immergée Reda, de type M 675 "A", de 7 étages, de performances maximales $220 \text{ m}^3/\text{h}$ pour 64 Hz, HMT 200m.

Cette pompe, posée le 15/09/1986, a remplacé une pompe Byron Jackson 11 MQH 5 étages ($250 \text{ m}^3/\text{h}$, 210m), posée initialement.

- . une pompe d'injection Alsthom ($250 \text{ m}^3/\text{h}$; 380m).
- . une pompe d'injection de secours Alsthom ($120 \text{ m}^3/\text{h}$; 17 bars).
- . 3 échangeurs à plaques titane de marques et caractéristiques différentes :

- . 1 Barriquand de 9750 Th/h
- . 1 Alfa Laval de 4240 Th/h
- . 1 Alfa Laval 1500 Th/h

En hiver les 3 échangeurs sont en série, tandis que 2 sont en fonctionnement en été.

- . des canalisations en fibre de verre, côté exhaure, de diamètre 200 (Bonstrand ; 140m et Trouvay-Cauvin sur 20m).

Des canalisations en époxy renforcé fibre de verre, côté injection, de diamètre 200 (star, de Trouvay-Cauvin, sur 150m).

Tableau 1 - CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

FORAGE	Profondeur toit du Dogger en m	Epaisseur productive en m	Porosité en %	Transmissivité en D.m	Salinité g/l	Température de fond fin foration	Débit artésien fin foration m ³ /h	Pression artésienne en bars
	Réalité	Réalité	Réalité	Réalité	Réalité	Réalité	Réalité	Réalité
PRODUCTION	1687	27	17	44,76		71,6	97,3 CP = ? 183 CP = 0	7
INJECTION	1681 vertical	24 vertical	15	36,4	27	71,5	90 CP = ?	6,9

CARACTERISTIQUES DES NIVEAUX PRODUCTIFS

DOUBLET GEOTHERMIQUE AULNAV-SOUS-BOIS

GAY 1 (puits de production vertical)				GAY 2 (puits d'injection dévié)			
Profondeur (m)	Epaisseur (m)	Débit %	Porosité %	Profondeur corrigée (m)	Epaisseur (m)	Débit %	Porosité %
<i>COMBLANCHIEN (faciès d'arrière barrière)</i>							
1697,5-1698,0	0,5	4	20				
1702,0-1705,5	3,5	6	16	1701,7-1703,7	2,0	5,5	18,5
1714,0-1718,5	4,5	10	16	1707,1-1709,0	1,9	3,3	8
1720,5-1722,5	2,0	7	17	1712,9-1715,2	2,3	4,6	8
1723,5-1724,5	1,0	3	16	1717,0-1718,6	1,6	3,3	10
<i>OOLITHE BLANCHE (faciès de barrière)</i>							
1725,0-1728,0	3,0	26	16	1724,0-1732,4	8,4	72,2	16
1729,5-1731,0	1,5	25	22				
<i>Facès d'avant barrière</i>							
1742,0-1746,5	4,5	9	14	1734,0-1737,7	3,7	5,5	7
1753,0-1758,0	5,0	5	21	1740,0-1744,2	4,2	5,6	8
1779,0-1780,5	1,5	5	19				

Tableau 2 Document BRGM

AULNAY SOUS BOIS-ROSE DES VENTS
 SCHEMA DE LA BOUCLE GEOTHERMALE
 LOCAL TECHNIQUE

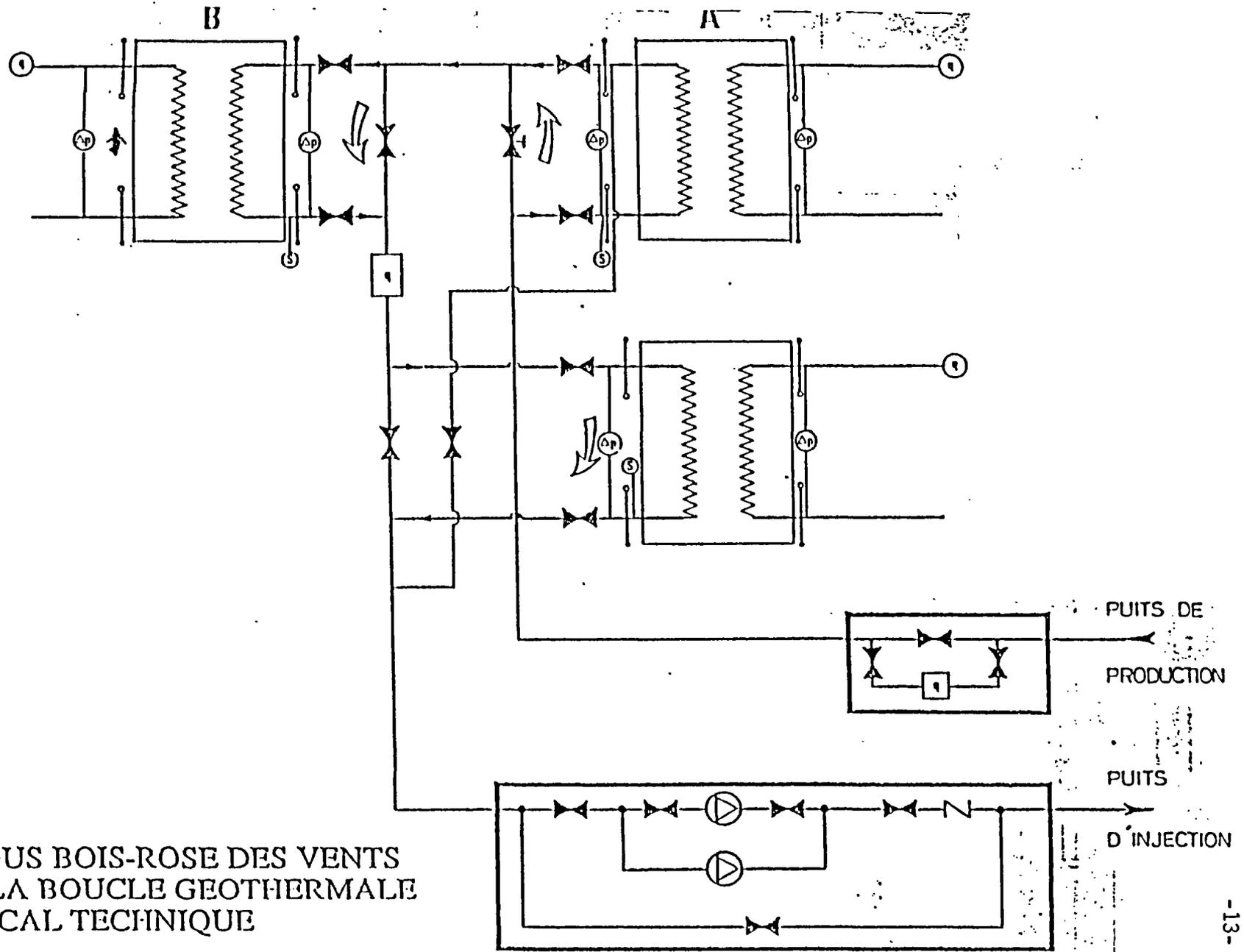
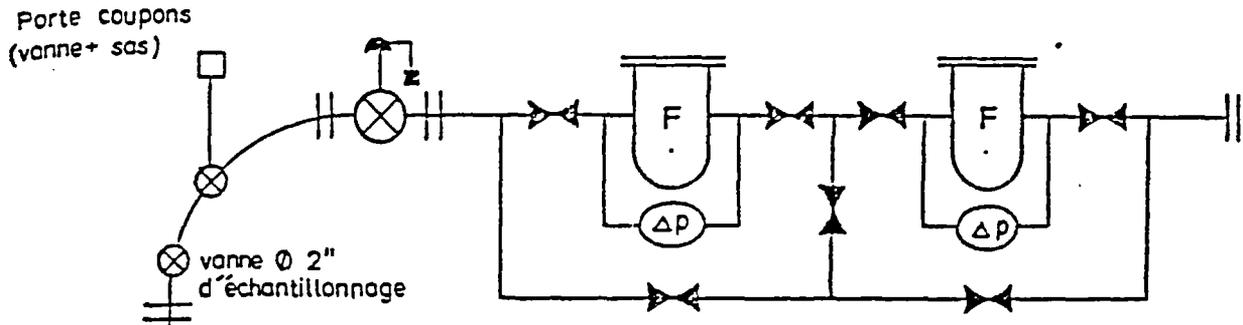
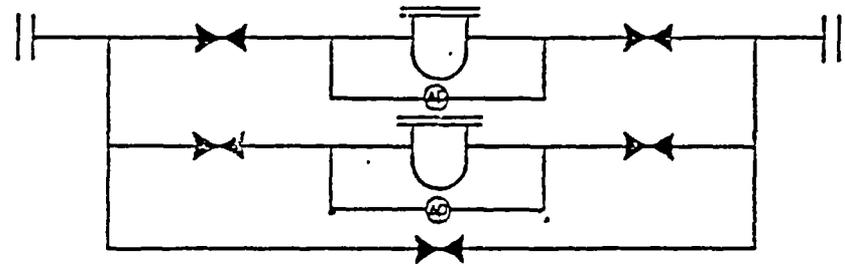
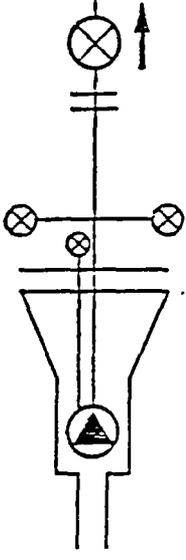


Figure 5 Document GEOPHASE

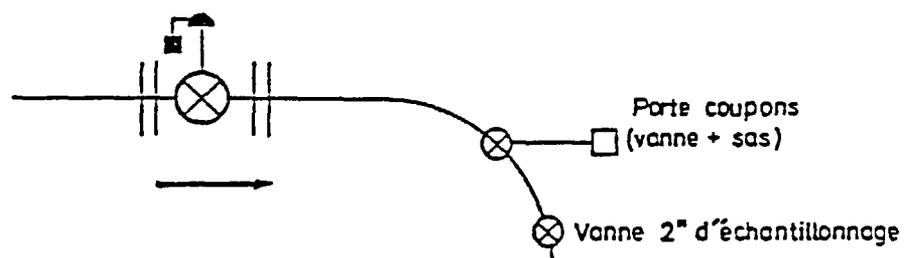
A TETE DE PUIIS DE PRODUCTION



ou

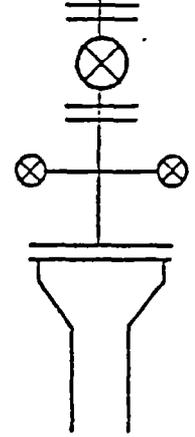


B TETE DE PUIIS D'INJECTION



TETES DE PUIIS

Schémas prévisionnels
Figure 5 bis Document GEOPHASE



. au début 1988, il n'y avait pas de filtres dans la boucle géothermale, ni de décanteur.

Il est prévu la pose, en amont des échangeurs, de filtres PN 16, en acier inox 316 L, avec paniers de 50 microns.

5 - OBSERVATIONS SUR LE FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS DE LA BOUCLE GEOTHERMALE

Le fonctionnement de la boucle géothermale d'Aulnay Rose des Vents a connu plusieurs difficultés, liées essentiellement au chimisme de l'eau et à la formation de sulfures de fer.

5.1. - Mise en service

La mise en service de la boucle a eu lieu en Février 1982, soit 7 mois après la réalisation des travaux de forage, ce qui représente un délai plutôt court.

Le fonctionnement fut d'abord assuré uniquement en artésien, jusqu'au 15/11/1984, date à laquelle fut mise en service la pompe électrique immergée BJ.

La réinjection était assurée par la pompe Alsthom de $120\text{m}^3/\text{h}$.

5.2. - Principaux incidents de fonctionnement

Les incidents les plus graves ont affecté la pompe d'exhaure et les échangeurs, avec une recrudescence des incidents en 1986, époque où fut alors mis en place un suivi sous-sol (Géophase).

Il semblerait y avoir eu peu d'incidents pendant la période de fonctionnement en artésien (mais on dispose de peu d'informations).

- Incidents sur la pompe d'exhaure :

- . mise en place de la pompe BJ le 15/11/1984.
- . arrêt le 05/12/1984, après rupture d'une clavette ; fonctionnement en artésien pendant quelques jours et échange pompe.
- . 27/09/1985 : blocage pompe.
- . 29/10/1985 : blocage pompe.
- . 22/11/1985 : blocage pompe.
- . 22/08/1986 : blocage pompe avec échange, du 15 au 19/09/1986, de la pompe BJ par une pompe Reda.

La pompe Reda a fonctionné sans incident notable jusqu'à la réhabilitation de Février 1988, malgré un arrêt de près d'un mois dû à un incident sur une autre partie de la boucle.

Les blocages sont imputables à des dépôts de sulfures de fer. Ils apparaissent plutôt en début de saison de chauffe, après un fonctionnement d'été à un régime en fait peu ralenti par rapport à l'hiver (pour 1985 et suivants).

D'autre part, on signale un incident sur le cable électrique de la pompe (endommagement du cable, en fond de cave de tête de puits, constaté le 27/05/1987).

- Encrassement des échangeurs :

L'encrassement des échangeurs n'aurait pas été observé pendant le fonctionnement en artésien (1982-1984).

Il n'apparaît qu'après 2 ans de fonctionnement à débit élevé (avec pompes).

L'échangeur Barriquand se colmata le premier, avec arrêt le 25/09/1986. Après un nettoyage à l'acide, la boucle géothermale fut remise en service, et les 2 échangeurs Alfa laval se colmatèrent peu après (arrêt total le 24/11/1986). Ils furent démontés (jetting des plaques).

Depuis Mars 1987, les encrassements ont eu tendance à s'accroître, les pertes de charge au passage des échangeurs augmentant de 10 à 20m.

Un nouveau nettoyage eut lieu en Février 1988.

Une analyse des dépôts recueillis sur un échangeur confirma que ceux-ci étaient formés surtout de sulfures de fer.

Rappelons d'une part que les échangeurs ne sont pas protégés par des filtres, d'autre part que les analyses granulométriques faites en tête de puits (21/08/1986) montre que les particules sont, à près de 75%, d'un diamètre de 0.2 microns, ce qui pose le problème du choix du tamis.

- Percement d'un des échangeurs :

Du fluide géothermal, à salinité élevée, fut décelé dans les canalisations géothermiques en Janvier 1987, mettant en évidence un percement.

10 plaques, environ, se sont avérées fissurées après décapage dans un bain d'acide.

Il pourrait s'agir de défauts de soudures.

- Panne de pompe de réinjection :

Un défaut de garnitures de la pompe de réinjection principale, le 24/01/1987, entraîna un arrêt, puis le fonctionnement sur la pompe de secours. Le moteur de cette dernière grilla le 03/02/1987.

Le délai d'approvisionnement des garnitures s'avéra long : elles ne furent changées qu'après 3 semaines, le 13/02/1987.

- Têtes de puits :

La vanne maîtresse du puits d'exhaure fut changée début Janvier 87, soit une durée de vie de 5.5 ans.

De même, une perte d'étanchéité fut signalée en Juillet 1987 sur la tête de puits injection (forte corrosion sur l'ensemble casing head, slips et tubages).

- Fuites de canalisations :

Plusieurs fuites ont été signalées, dès l'été 1984, dont l'une, dans le local, provoqua la détérioration du moteur électrique de la pompe de réinjection, puis son rebobinage.

- Incidents électriques :

Outre la détérioration du moteur électrique de la pompe de réinjection (due à une fuite d'eau), on signale un incident sur le variateur, début Novembre 1985 (défaut d'une résistance électrique).

- Pertes de productivité et d'injectivité :

Ces difficultés, qui ne résultent pas d'un incident sur les matériels, seront abordés au chapitre suivant.

On constate que :

- . les incidents semblent avoir été rares pendant la phase de fonctionnement en artésien (2 premières années). Mais nous possédons, en fait, peu d'indications.
- . les incidents sur les pompes sont apparus très vite, après moins d'un an de fonctionnement. Ils se sont produits plutôt en début de saison de chauffe, après fonctionnement d'été à régime ralenti (1984) ou peu ralenti (1985 et suivants).
- . les encrassements d'échangeurs ne sont apparus qu'après près de 5 ans de fonctionnement et peu après un arrêt de plusieurs jours, pour changement de pompe.
- . presque tous les incidents sont liés au chimisme de l'eau : dépôts de sulfures de fer (encrassement des échangeurs ; blocage pompe) ; corrosion des parties métalliques.

6 - EXAMEN DE L'EVOLUTION DES DEBITS

Les données disponibles sont :

- . mesures en fin de forages.
- . relevés de l'exploitant (débit ; pressions ; températures ; intensité et fréquence).
- . contrôle Veritas du 17/10/1987.
- . suivi du Maître d'Oeuvre Sous-Sol : Géophase.

Très récemment, un télésuivi de plusieurs paramètres a été mis en place.

Très peu de données existent concernant les 2 premières années, où le fonctionnement se faisait en artésien, avec semble-t-il un débit proche de $120\text{m}^3/\text{h}$. De même, nous disposons de peu de données pour la période 1984-1986.

D'autre part, certaines mesures posent le problème de la fiabilité des compteurs de débit (ici Débitmag, de Schlumberger). Ainsi il semblerait y avoir une dérive par rapport aux mesures Veritas.

On constate une perte de productivité et d'injectivité, exposées ci-après.

On rappelle que le débit contractuel SAF est de $158\text{m}^3/\text{h}$ (pour une température d'exhaure de 69.6°C et de 30°C à l'injection).

6.1. - Evolution du puits d'injection

On constate une forte baisse de l'injectivité depuis la mise en service de la géothermie.

Le débit d'exploitation est passé d'un nominal de $250\text{m}^3/\text{h}$ à une valeur de $130\text{m}^3/\text{h}$ seulement, après 5 ans de fonctionnement.

La valeur nominale de $250\text{m}^3/\text{h}$ a été déduite des essais de fin de foration (1981). Elle a conditionné le choix de la pompe.

Cette valeur n'a jamais été atteinte en exploitation ni même, une fois la pompe installée, lors d'essais par paliers.

La valeur maximale enregistrée est de $230\text{m}^3/\text{h}$, le 22/03/1985, lors d'essai de réception du groupe moto-pompe (la réception ayant été prononcée après 4 mois de fonctionnement ; on constate déjà une baisse de l'injectivité, qui a limité le débit maximal. Faute de mesures, on ne peut dire si cette baisse est apparue pendant le fonctionnement en artésien ou après mise en route du pompage).

A cette époque pour un débit de $200\text{m}^3/\text{h}$, la pression dans le réservoir passait de $9.8\text{kg}/\text{cm}^2$, à l'origine, à $28.5\text{kg}/\text{cm}^2$.

Les $18.7\text{kg}/\text{cm}^2$ de pertes de charge supplémentaires ont été attribués essentiellement à un colmatage pelliculaire ainsi qu'à un comblement partiel du découvert.

La baisse d'injectivité s'accroît en 1986 et 1987 (cf. Figure 6), pour atteindre $4.7\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ en Juin 1987, contre $13.6\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ nominaux (soit une perte de 65%).

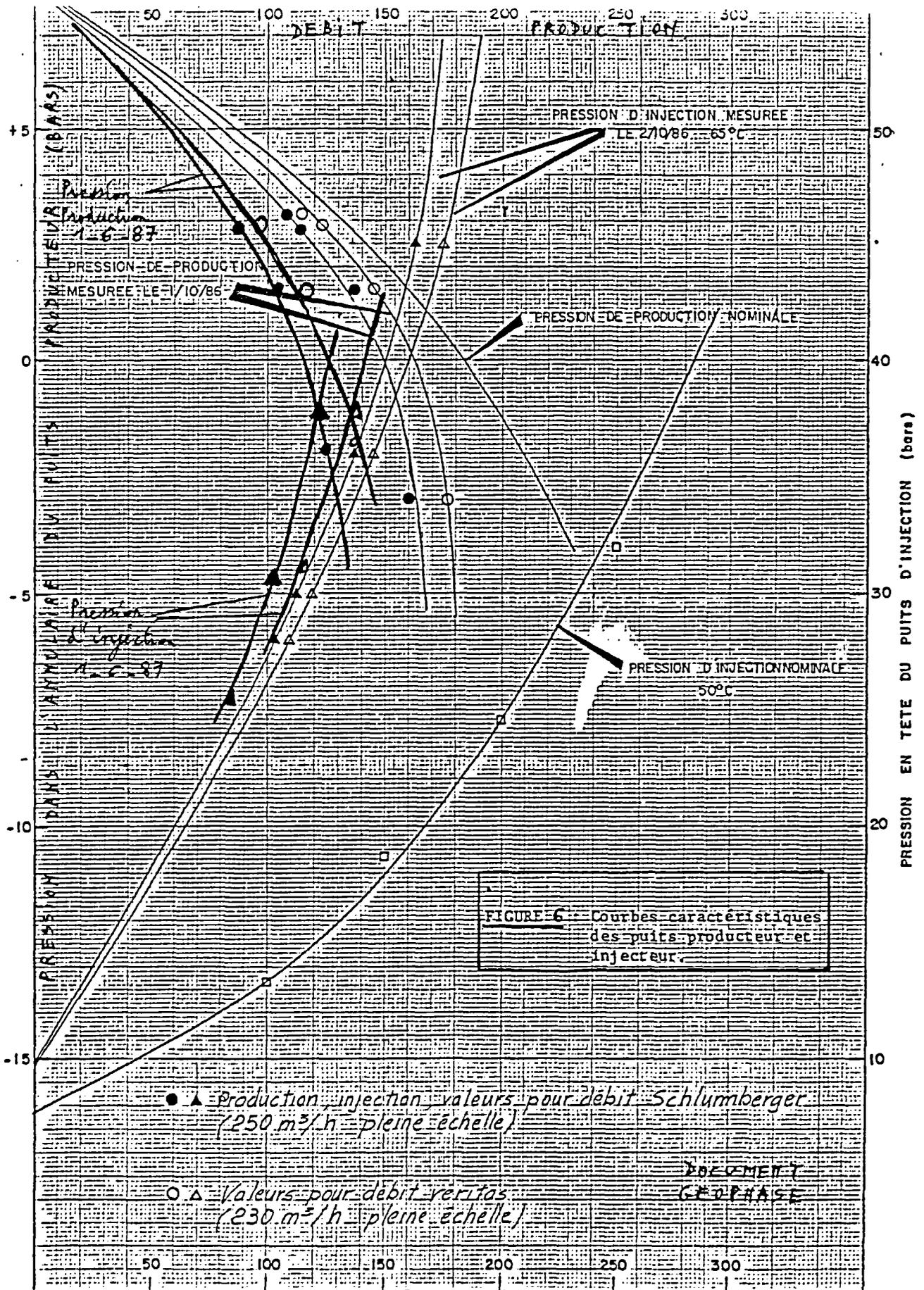
6.2. - EVOLUTION DU PUITZ D'EXHAURE

La dégradation du puits d'exhaure est apparue plus tardivement, en 1986, soit après la perte d'injectivité.

En effet, les mesures BRGM de Mars 1985 n'ont pas montré de dégradation des caractéristiques par rapport aux valeurs nominales, mais au contraire une légère amélioration (cf. Figure 6). Toutefois, il y avait incertitudes sur les mesures (débitmètre non étalonné, pas de mesure de rabattement). En outre, les valeurs nominales sont des données théoriques, qui n'ont pas été confirmées par des mesures, à la mise en exploitation. Elles ne représentent donc pas forcément l'état initial réel du puits.

Les courbes caractéristiques suivantes ont été établies par Géophase (02/10/1986 et 29/07/1987). Elles montrent :

- . une baisse du débit artésien (pression de tête nulle) : $183\text{m}^3/\text{h}$ en fin de complétion ; $150\text{m}^3/\text{h}$ le 02/10/1986; $125\text{m}^3/\text{h}$ le 01/06/1987.
- . une chute de l'indice de productivité, particulièrement nette à l'été 1987 : $25\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ en nominal; $21.5\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ en Octobre 1986; $12.5\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ en Juin 1987 (pour un débit de $150\text{m}^3/\text{h}$).



Le puits semble commencer sa dégradation après l'été 1986 : des incidents sur la pompe, des encrassements des échangeurs ont accompagné la première baisse constatée de productivité, 4 ans après la mise en service et 2 ans après le démarrage des pompes.

La baisse de productivité n'est pas contemporaine de la mise en service des doublets voisins (Aulnay-Gros-Saule : Oct. 1984; Bondy : Nov.1984; Sevran : Sept. 1983; Blanc-Mesnil : Oct. 1983).

7 - ETAT DES FORAGES

Les mesures faites en surfaces ont montré une dégradation des puits. Il restait à vérifier si les pertes d'injectivité/productivité étaient imputables à un colmatage du découvert, à des dépôt sur les casings, et à tenter d'identifier des corrosions sur les tubages :

7.1 - Auscultation du puits d'injection

Les mesures BRGM de Mars 85 ont montré une dégradation des caractéristiques du puits d'injection, et ont motivé, le 30 Mai 1985, une diaggraphie de calibrage.

Celle-ci a montré :

- . la présence de dépôts indurés, de quelques millimètres, sur toute la partie déviée du tubage, et leur absence dans la partie verticale (sauf quelques pics sporadiques).

- . un épaissement des dépôts, du haut vers le fond, sauf au sabot du 7" (cf. tableau 3), où la déviation est moindre.

- . l'absence de corrosion décelée (mais une corrosion peut toutefois exister sous les dépôts).

Il n'y a pas eu de contrôle du fond, permettant de montrer d'éventuels dépôts en face des horizons producteurs.

L'état des tubages face aux aquifères superficiels (100 premiers mètres) n'a pas été vérifié (cependant, ces aquifères sont protégés ici par 3 casings cimentés).

D'autre part la forte déviation des tubages (59°) a généré l'utilisation du calibreur, qui a besoin d'être toujours parfaitement centré.

Une autre auscultation du puits injecteur a été réalisée en Février 1988 par Géophase, après restauration.

Elle a montré :

- . contrôle de profondeur : sonde arrêtée à 2231m soit 23.5m au dessus de la cote théorique.

Il peut toutefois s'agir d'un défaut de centrage de la sonde, dans un puits fortement dévié.

Quoi qu'il en soit, il n'y a pas de dépôts indurés en face des horizons producteurs (cf. figure 4).

- . calibrage 40 bars : tubage fortement corrodé, fortes rugosités résiduelles au niveau des build up et corrections de déviations.

TABLEAU DE CALCUL DE PERTES DE CHARGES PAR SECTION

Profondeurs (m)	L (m)	Dépôt (mm)	Diamètre (mm)	Perte de charge kg/cm ² (cumul)
0 - 870	870	0	159,4	3,47
870 - 925	55	0,4	158,6	3,69
925 - 1030	105	0,79	157,82	4,13
1030 - 1180	150	1,59	156,22	4,79
1180 - 1390	210	2,38	154,64	5,77
1390 - 1625	235	3,18	153,04	6,92
1625 - 1850	225	3,97	151,46	8,09
1850 - 2000	150	4,76	149,88	8,91
2000 - 2118	118	3,18	153,04	9,48

Remarque : Dans ce tableau, les deuxièmes décimales correspondent à la précision du calcul, mais seuls les ordres de grandeur doivent être considérés.

Aulnay Rose des Vents forage d'injection
 diagraphie de mars 1985
 Tableau 3 d'après BRGM

Les corrosions les plus marquées sont aux cotes :

- . 1050
- . 1230
- . 1440
- . 2010

Une nouvelle diagraphie du 7" est à prévoir, lors de la prochaine saison de chauffe.

- . contrôle du découvert : présence de forte caves sous le sabot.

7.2 - Auscultation du puits de production

Le puits de production n'a été ausculté qu'à l'occasion de sa réhabilitation.

- . contrôle profondeur (après nettoyage) : fond mesuré à 1839.4m, soit pratiquement la valeur nominale.
- . calibrage des casings : mise en évidence d'une corrosion sur l'ensemble du 7", pouvant atteindre 3mm, plus prononcée dans les 100m supérieurs, et d'une corrosion généralisée du tubage 13^{3/8}, plus importante sous la cote d'immersion de la pompe (190m), plus particulièrement entre 190 et 260m).
- . contrôle du découvert : (avant et après acidification).

Des diagraphies de corrosion (BHTV par exemple) sont à exécuter le plus tôt possible dans la chambre de production.

8 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU FLUIDE GEOTHERMAL

Le fluide géothermal d'Aulnay Rose des Vents se caractérise par : (cf. tableau 4).

- . une salinité totale élevée, proche de 26 g/l., dont 23g/l. de Na Cl.
- . une teneur élevée en sulfures. (31.5mg/l).
- . une teneur élevée en sulfates.

- . une fraction gazeuse où dominant l'azote, le gaz carbonique, les dérivés du méthane, et l' H_2S .

Nous disposons de peu d'autres analyses chimiques (cf. tableau 5), ce qui rend délicate l'interprétation de l'évolution des puits. 5 ans après, il ne semble pas y avoir eu de modifications notables des caractéristiques chimiques, en particulier, les teneurs en sulfures. On note une légère diminution de la teneur en fer (la teneur initiale pouvant être " polluée" par les travaux de foration).

En tête de puits de production, on relève plusieurs valeurs de pression (7.3 à 7.8 bars) très proches du point de bulle (7.5 bars à 70°) et, parfois, nettement en dessous (ex. Février-Mars 1987 : 3-5 bars). De même, à la réinjection on note plusieurs valeurs très proches du point de bulle (à l'entrée de la pompe) et parfois nettement inférieures.

9 - RESTAURATION DES OUVRAGES

La sévère perte à la fois d'injectivité puis de productivité nécessitait une opération de réhabilitation. Celle-ci fut réalisée en Février-Mars 1988.

Aulnay Rose des Vents

ANALYSE D'EAU (30/04/1981)

=====

(Synthèse des différentes mesures)

Fin de foration

- PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

T* : 6,4° C pH : 6,35 Résistivité : (Ohm/cm) : 76 Ω/cm à 20° C
Salinité totale (g/l) : 25,733 g/l
Résidu Sec après 24 h à 110° C = 19,530 g/l
Résidu Sec après 2 h à 550° C = 19,125 g/l

- ELEMENTS MAJEURS (Concentrations en mg/l) :

Cations : Ca : 1040 Mg : 352 Na : 7900 K : 110
Anions : HCO₃ : 308 Cl : 14 910 SO₄ : 885 NH₄ : 18
Complexes : SiO₂ : 73,5

- ELEMENTS EN TRACE : (concentration en mg/l)

Ba : < 1 Li : 2,40 Rb : < 0,1 Sr : 72 B : 8
Fe : 1,00 F : 2,0 S²⁻ : 31,5

- GAZ DISSOUS : (concentration en mole/litre)

CO₂ : 9,6.10⁻⁵ Ar : - O₂ : 3,5.10⁻⁶ N₂ : 3,5.10⁻⁴ CH₄ : 3,1.10⁻⁵
C₂H₆ : 1,7.10⁻⁵ H₂S : 1,6 x 10⁻³

- GAZ LIBRES : (concentration en % molaire à 1 Atm et 20° C)

CO₂ : 42,28 Ar : - O₂ : 0,71 N₂ : 43,31 CH₄ : 10,77
C₂H₆ : 0,73 H₂S : 2,20

* Mesures effectuées sur le terrain

RESULTATS D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES
(Prélèvements de surface du 21 août 1986)

		MONT ECHANGEUR Tête puits de production			
1/ CARACTERISTIQUES GENERALES					
Pression (bars rel.)		9			
Température (°C)		67			
Débit (m ³ /h)		134			
Résidu sec (g/l)		26 200			
Matières en suspension (mg/l) (> 0,5 µm)		7,7			
pH (20°C, in situ)		6,4			
Conductivité 20°C (µS·cm ⁻¹)		58 200			
Redox (mV)					
		mg/l	me/l	mg/l	me/l
2/ ELEMENTS MAJEURS					
CO ₃ ⁼		0	0		
HCO ₃ ⁻		333	5,46		
Cl ⁻		14 700	414		
SO ₄ ⁼		970	20,2		
Ca ⁺⁺		1 100	55		
Mg ⁺		340	28		
Na ⁺		8 200	356		
K ⁺		132	3,4		
3/ DIVERS DONT TRACES					
Nitrates (NO ₃)		< 0,01			
Nitrites (NO ₂)		0,09			
Phosphates (PO ₄)		0,22			
Fluorures (F)		3,8	0,2		
Sulfures (S)		29	1,8		
Silice (SiO ₂)		29			
Mercaptans (HS ⁻)					
NH ₃		20	1,1		
Fer total		0,02			
Fer dissous		< 0,02			
Mn		0,07			
Cu		< 0,02			
Sr		61	1,4		
Ba		< 1			
Cr total		< 0,05			
Ni		< 0,02			
Al		< 0,5			
Total Anions			441,7		
Total Cations			444,9		
CO ₂ in situ		486			
O ₂ in situ		< 0,05			

ANALYSE PVT D'UN ECHANTILLON DE FLUIDE GEOTHERMAL

PRELEVE EN TETE DU Puits DE PRODUCTION

LE 21 AOUT 1986

PARAMETRES	TEMPERATURES		
	70°C	40°C	
Point de bulle (bars rel.)	7,5	5,6	
Viscosité dynamique (Cp) à 0 bar rel.	0,540	0,818	
Masse volumique (kg/m ³) à 15°C : 1 018			
Coefficient d'expansion thermique (10 ⁻³ °C ⁻¹) à 150bars rel.	1,120	0,882	
PHASE GAZEUSE DISSOUTE			
Composition (Z vol.) : N ₂ = 94,38			
CO ₂ = 3,76			
CH ₄ = 1,86			
C ₂ H ₆ = -			
Rapport gaz/liquide (vol.) : GLR = 0,1 m ³ /m ³			
Masse moléculaire (g) = 28,389			
Densité (air = 1) = 0,980			

Les résultats sont (hors boucle) :

. forages d'injection :

. après curage : débit de $118.2\text{m}^3/\text{h}$, 48°C , à $2.5\text{m}/\text{sol}$.
(soit $18\text{m}^3/\text{h}$ pour 70°C à la cote sol : la valeur nominale est pratiquement retrouvée).

. forage d'exhaure :

après curage à l'outil : débit artésien de 136 à $140\text{m}^3/\text{h}$, à 68°C .
après acidification : $172\text{m}^3/\text{h}$ à 68°C .

La valeur nominale est pratiquement retrouvée .

Il reste à effectuer les essais en boucle.

La dégradation du doublet résulte du chimisme particulier de l'eau (formation de dépôts de sulfures de fer avec corrosions). Les mêmes causes produisant les mêmes effets, une nouvelle dégradation ne peut être évitée ou ralentie que si un traitement chimique est appliqué.

Celui-ci ne protégera l'ensemble du doublet que si l'injection s'effectue à la base du 7" de production.

La pose d'un tube d'injection profond a été tentée et réussie par Géophase, à Aulnay Rose des Vents, en Mars 1988, juste après la réhabilitation.

Le tube est en teflon de \emptyset 6mm intérieur, placé dans un tube acier, et descendu à 1800m. Le flexible intérieur peut coulisser dans le tube acier.

L'injection de produits devrait commencer fin Mars 1988.

Le produit choisi est un dispersant, piégeant du fer et filmant : le FDC 1300 de Protex.

L'efficacité du traitement sera mesurée par :

- . le suivi des caractéristiques de productivité et d'injectivité des ouvrages.
- . un suivi de corrosion, en surface, sur des coupons témoins.
- . des diagraphies de corrosion des tubages, par exemple après 1 an de fonctionnement.

On espère que le traitement ralentira de façon importante la corrosion. Or celle-ci a déjà atteint, localement, un niveau inquiétant sur le 13^{3/8} et des risques de percement existent.

Un rechemisage est à envisager si la corrosion se poursuit. Un rechemisage partiel, sur les seules parties percées, risque de ne pas être pleinement efficace, de nouveaux percements pouvant se créer plus bas. Il faut alors envisager un rechemisage, en matériaux composites, sur l'ensemble de la chambre de pompage (640m).

10 - ENERGIE GEOTHERMALE PRODUITE

Les pertes de débit ont été examinées dans un précédent chapitre. Les aspects régulation en surface, fonctionnement de la boucle géothermique sont examinés par l'audit "surface".

Nous rappelons ici, les quantités annuelles d'énergie géothermale produite (cf. tableau 6).

On constate :

- . une fourniture stable pendant la période de fonctionnement en artésien (1982-1984).

Doublet géothermique d'Aulnay Rose des Vents

Couverture géothermique

Saison de chauffe	MWh fioul	MWh géothermie	Total	Taux de couverture géothermique (%)
1981 - 1982 (*)	15 852	8 714	24 566	35,5
1982 - 1983	38 397	15 651	54 048	29
1983 - 1984	41 125	15 863	56 988	28
1984 - 1985 (**)	37 505	24 476	61 981	39,5
1985 - 1986	67 161	22 880	90 041	25,5
1986 - 1987 ***	61 933	17 120	79 053	21,65

* De février à juin

** Raccordements supplémentaires, mise en service (février 1984) de l'électropompe immergée de production

*** Du 1er juillet 1986 au 18 mai 1987

- . une augmentation de fourniture permise par la mise en service de la pompe immergée, avec augmentation du ratio MWh géothermal/m³ d'eau, en 1984-1985
- . une baisse de fourniture continue depuis 1984-1985 et s'accroissant en 1986-1987, due à la fois à une moindre disponibilité (incidents plus longs) et à un moindre débit d'exploitation.

11 - COMPTES D'EXPLOITATION PREVISIONNELS DE LA BOUCLE GEOTHERMALE

L'exploitant (CGC) a passé un contrat de gros entretien-garantie totale sur une partie de la boucle géothermale (le système d'exhaure complet, ainsi que les têtes de puits). Ce contrat a été passé avec Géophase en Octobre 1986.

La CGC assure directement l'entretien et la garantie totale, des échangeurs, des canalisations de la boucle géothermale, ainsi que du groupe moto-pompe d'injection.

Les casings de forage n'entrent pas dans le cadre de la garantie totale. Une assurance SAF a été souscrite par le Maître de l'Ouvrage.

Pour le compte d'exploitation prévisionnel, nous examinerons 2 scénarios possibles d'évolution du débit, selon une hypothèse optimiste et selon une hypothèse pessimiste. Nous insistons sur le fait qu'il s'agit de scénarios possibles : en effet la prévision des débits et incidents se heurte à une maîtrise encore incomplète de la compréhension des phénomènes et certains remèdes sont encore au stade expérimental.

Le point de départ des 2 scénarios est la situation de Mars 88, où les 2 forages ont été réhabilités et où un dispositif d'injection d'inhibiteurs a été descendu en fond de puits de production. On suppose réalisée la pose des filtres, des coupons porte-témoins de corrosion, des vannes d'échantillonnage, pour la prochaine saison de chauffe.

Hypothèse optimiste :

- . injection de produits inhibiteurs de corrosion.
- . maîtrise des incidents liés aux corrosion et aux dépôts de sulfures de fer d'où diminution des arrêts.

Taux moyen de disponibilité envisagé = 96 %.

- . ralentissement important de la corrosion des casings, permettant, avec un suivi régulier, de ne pas envisager de rechemisage.
- . contrôle des casings par diagraphies, lors des 2 prochaines saisons de chauffe, tous les 3 ans ensuite, si l'évolution de la corrosion le permet.

Pour le puits de production, les diagraphies se feront autant que possible lors des opérations d'entretien de la pompe. Toutefois, on considère qu'en 1988-1989, la pompe sera remontée spécialement pour les besoins de la diagraphie. (Coût de la remontée - descente supplémentaire environ 130 kF).

- . suivi des paramètres physiques et chimiques de la boucle, ainsi que des coupons témoins de corrosion, avec prise en compte d'un surcoût pour analyses supplémentaires, par rapport au contrat Géophase actuel.
- . légère décroissance du débit, correspondant à une légère altération de l'état de surface des casings et/ou la formation de dépôts peu épais et/ou un colmatage partiel des zones perméables.
- . nettoyage des 2 forages, après 8 années de traitement. On suppose qu'à cette époque les techniques de réhabilitation à coût moindre (Coflexip ; jetting ?) seront opérationnelles. Ne sont pas pris en compte ici les coûts de génie civil liés à la proximité de la voie autoroutière.

- . en première approximation, on considère que la consommation électrique annuelle de la station géothermale est sensiblement constante.
- . les renouvellements des principaux matériels (montants et date du premier renouvellement) sont indiqués au tableau 7. Les valeurs sont portées entre parenthèses, pour rappeler qu'elles ne s'ajoutent pas au contrat, en cours, de l'exploitant, mais qu'elles en font partie.

Le renouvellement des forages eux-mêmes n'est pas envisagé ici.

Hypothèse pessimiste :

- . injection de produits inhibiteurs.
- . maîtrise incomplète des incidents liés aux corrosions et aux dépôts de sulfures de fer ; apparition de phénomènes secondaires pouvant créer de nouveaux incidents.

Taux moyen de disponibilité envisagé : 92 %.

- . ralentissement insuffisant de la corrosion des casings, notamment au niveau de la chambre de production. On admet, arbitrairement, ici, que seule cette dernière sera rechemisée en matériaux composites, 12 ans après la mise en service.
- . contrôle des casings par diagraphies, avec suivi plus attentif de l'évolution de la corrosion. On considère que pour le puits de production les diagraphies se font autant que possible lors des opérations de maintenance de la pompe, sauf pour la prochaine saison.
- . suivi des paramètres physiques et chimiques de la boucle, ainsi que des coupons témoins de corrosion, avec prise en compte d'un surcoût pour analyses supplémentaires, par rapport au contrat Géophase actuel.

- . décroissance plus marquée des débits, correspondant à une perte d'efficacité dans le temps du produit (?), à une altération de l'état de surface des tubages ; il peut aussi être envisagé des arrêts involontaires d'injection (rupture du TAI par exemple) qui, même courts, peuvent permettre des phénomènes entraînant une baisse de débit.
- . 3 réhabilitations sont envisagées ici (soit 4 au total, depuis la mise en service, chiffre qui paraît maximal si des "techniques douces" de curage ne sont pas opérationnelles d'ici là).

On considère que le premier curage se fera de manière traditionnelle (outils + train de tiges ; acidifications) et les 2 suivantes par méthodes plus légères et moins coûteuses (coflexip, jetting ? ...)

- . les renouvellements des principaux matériels sont indiqués au tableau 8, en tenant compte que la persistance de certains incidents tend à diminuer la durée de vie des matériels.

Le renouvellement des forages eux-mêmes n'est pas envisagé ici.

CONCLUSION

Le doublet géothermique d'Aulnay Rose des Vents a connu plusieurs incidents (blocages répétés de la pompe d'exhaure ; encrassements des échangeurs, notamment), en même temps qu'il était observé une baisse de performances des puits, d'abord sur le puits d'injection, puis sur le forage d'exhaure.

Les pertes de productivité-injectivité ont fait chuter le débit d'exploitation de $250\text{m}^3/\text{h}$ (caractéristiques initiales) à $150\text{m}^3/\text{h}$.

Ces incidents, de même que les endommagements des puits sont liés à des phénomènes de dépôts de sulfures de fer et de corrosion. Ils semblent avoir débuté peu après la mise en route de la pompe d'exhaure (1984), le pompage intervenant lui-même après 2 années de fonctionnement en artésien. Cependant, on dispose de peu de mesures de suivi pendant les 4 premières années (1982-1986) pour apprécier l'évolution réelle des puits.

Une réhabilitation, sur les 2 puits, a eu lieu en Février-Mars 1988 ; elle doit être suivie d'un traitement destiné à ralentir la corrosion et la formation de dépôts, au moyen d'un tube d'injection descendu en fond de puits.

Les récentes diagraphies ont montré l'existence de corrosions, plus particulièrement au niveau de la chambre de production, où elles atteignent un niveau préoccupant. La poursuite du suivi de la boucle géothermale s'avère indispensable et doit être renforcée (diagraphies ; suivi de coupons de corrosion ...).

Deux scénarios possibles d'évolution des débits ont été examinés ici, ainsi que les comptes prévisionnels correspondants de la boucle géothermale.

réalisation
service
reprographie
du BRGM