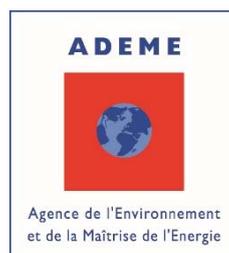
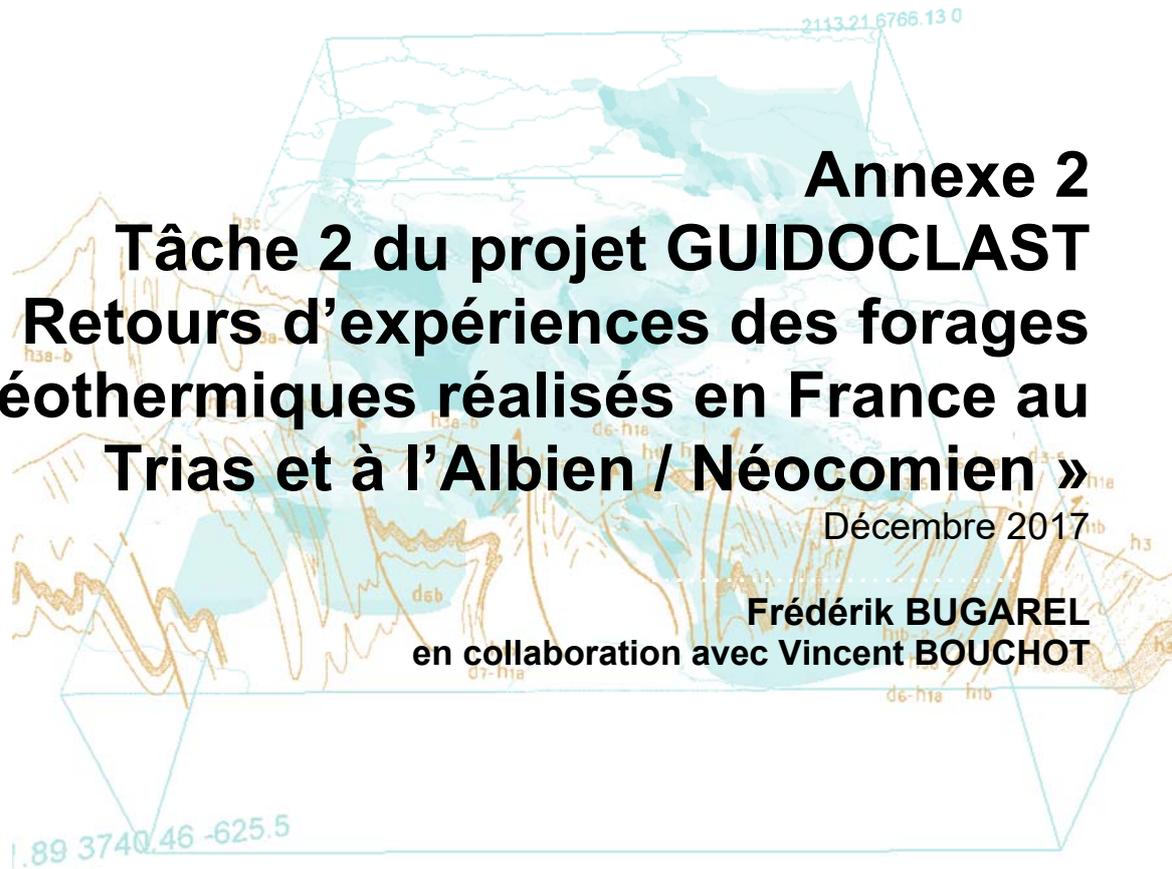




Annexe 2
Tâche 2 du projet GUIDOCLAST
« Retours d'expériences des forages géothermiques réalisés en France au Trias et à l'Albien / Néocomien »

Décembre 2017

Frédéric BUGAREL
en collaboration avec Vincent BOUCHOT



Sommaire

1. Introduction	5
2. Analyse technique des opérations géothermiques ayant ciblé l'aquifère profond du Trias	7
2.1. IDENTIFICATION ET LOCALISATION DES OPERATIONS AU TRIAS	7
2.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU RESERVOIR GEOTHERMAL	8
2.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES OPERATIONS AU TRIAS	10
2.4. LE RETOUR D'EXPERIENCES DES OPERATIONS AU TRIAS : UN APPRENTISSAGE AVORTE MAIS RICHE D'ENSEIGNEMENTS	20
2.4.1. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray	21
2.4.2. Principaux enseignements des opérations de Cergy-Pontoise et d'Achères	24
3. Analyse technique des opérations géothermiques ciblant les aquifères multi-couches de l'Albien / Néocomien (Crétacé inférieur).....	25
3.1. IDENTIFICATION ET LOCALISATION DES OPERATIONS	27
3.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU RESERVOIR GEOTHERMAL	28
3.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES OPERATIONS.....	29
3.4. LE RETOUR D'EXPERIENCES DES OPERATIONS A L'ALBIEN / NEOCOMIEN : UN APPRENTISSAGE EN COURS	50
3.4.1. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet des Tours AGF	50
3.4.2. Principaux enseignements des exploitations des doublets d'Issy-les-Moulineaux, du Plessis-Robinson et de Clichy-Batignolles	53
4. Synthèse des retours d'expériences des opérations du Trias et de l'Albien / Néocomien et préconisations.....	55
4.1. PRECONISATIONS A PROPOS DU TRIAS PROFOND	55
4.1.1. Stratégie d'exploration.....	55
4.1.2. Phases de conception du dispositif et de réalisation des travaux	55
4.1.3. Phase d'exploitation	56
4.2. PRECONISATIONS A PROPOS DE L'ALBIEN – NEOCOMIEN SUPERFICIEL	56
5. Bibliographie	59

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation des opérations géothermiques au Trias réalisées dans le BP et carte d’extension et d’épaisseur du réservoir.	8
Figure 2 : Carte du potentiel géothermique du Trias à l’échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008).	9
Figure 3 : Coupes techniques des forages au Trias de Melleray (GMY-1 et GMY-2).	11
Figure 4 : Coupe technique du forage au Trias de Cergy-Pontoise (GCY-1).	12
Figure 5 : Coupes techniques des forages au Trias d’Achères (GTH-1 et GTH-2).	14
Figure 6 : Complétion du forage producteur d’Achères (GTH-2).	16
Figure 7 : Coupe technique du forage au Trias de Châteauroux.	19
Figure 8 : Localisation des opérations de géothermie à l’Albien / Néocomien au centre du Bassin Parisien et piézométrie de la nappe (Vernoux, 1997)	26
Figure 9 : Localisation et identification des doublets géothermiques à l’Albien / Néocomien (Vernoux, 1997.	27
Figure 10 : Coupes techniques des forages à l’Albien des tours AGF (Crystal et Mirabeau).	29
Figure 11 : Coupe technique du forage producteur ILM-1 d’Issy-les-Moulineaux.	32
Figure 12 : Mise en évidence d’une venue d’eau anormale chargée en MES par l’espace annulaire du puits de production ILM-1 d’Issy-les-Moulineaux.	35
Figure 13 : Photographies des crépines des forages producteur ILM-1 (en haut) et injecteur ILM-2 (en bas) du doublet d’Issy-les-Moulineaux.	35
Figure 14 : Coupe technique du puits producteur LPR-1 du Plessis-Robinson.	40
Figure 15 : Coupe technique du puits injecteur LPR-2 du Plessis-Robinson.	41
Figure 16 : Photographie de l’hydrocyclone mis en place pour les essais du puits producteur LPR-1.	43
Figure 17 : Photographie du chantier de forage de Clichy-Batignolles (Paris 17 ^{ème}).	45
Figure 18 : Type de crépine adapté à la fonction des puits (production ou injection) mis en place pour le doublet de la ZAC Clichy-Batignolles.	47

1. Introduction

En France, le retour d'expériences des forages géothermiques ciblant des réservoirs clastiques est constitué principalement par les opérations ayant atteint l'aquifère argilo-sableux multi-couches (peu ou pas consolidé) de l'Albien / Néocomien et le réservoir argilo-gréseux (consolidé) du Trias dans le Bassin Parisien.

Ce retour d'expériences intègre :

- 4 opérations anciennes ayant ciblé le Trias au début des années 80 : Melleray, Cergy-Pontoise, Achères (forages > 1400 m) et Châteauroux (forage < 1000 m),
- 4 opérations ciblant les réservoirs multi-couches de l'Albien et du Néocomien (forage < 1000m de profondeur) dont celle des « Tours AGF » (Mirabeau et Crystal) à Paris (1989) et 3 opérations plus récentes (2011 à 2014) : Issy-les-Moulineaux, Plessis-Robinson et la « ZAC Clichy-Batignolles » à Paris.

L'analyse de ces opérations est présentée dans ce rapport-annexe en respectant l'ordre chronologique afin de percevoir l'évolution technique des dispositifs. Comme pour l'analyse technique des opérations danoises et hollandaises (Annexe 1), cette synthèse a pour objectifs de connaître :

- les contextes de réalisation (lieux, dates, opérateurs impliqués, stratégie d'exploration ou de développement) de ces opérations ;
- les moyens mis en œuvre et les caractéristiques de ces forages (architecture et profil des puits) ;
- les caractéristiques des réservoirs exploités ;
- les résultats obtenus en termes d'exploitation.

et au final d'en extraire des préconisations essentielles pour l'exploration et l'exploitation futures de ces réservoirs clastiques plus ou moins profonds.

2. Analyse technique des opérations géothermiques ayant ciblé l'aquifère profond du Trias

Après les premiers résultats favorables obtenus à partir des années 70 dans l'exploitation, par doublets de forages, de l'aquifère géothermique du Dogger du Bassin Parisien (Melun l'Almont réalisé en 1971, puis Creil en 1974 notamment), les grès du Trias plus profonds ont été ciblés à partir du début des années 80 en raison d'un potentiel énergétique *a priori* plus important que celui du Dogger. Outre le degré de température supérieur, son extension plus vaste au sein du Bassin Parisien et le nombre supérieur à l'échelle européenne de réservoirs argilo-gréseux par rapport aux réservoirs calcaires de type Dogger (Boisdet et al., 1989) permettaient d'envisager le développement de ce type d'opérations par doublet.

2.1. IDENTIFICATION ET LOCALISATION DES OPERATIONS AU TRIAS

D'un point de vue chronologique, le premier forage géothermique profond ayant atteint le Trias dans le Bassin Parisien a été réalisé en région Centre - Val de Loire, sur la commune de Saint-Denis-en-Val et le lieu-dit de Melleray (45).

L'objectif de ce dispositif était d'alimenter en chauffage 17 hectares de serres horticoles et florales (Lopez et al., 2008). Les travaux de forage du puits producteur (GMY-1) ont été menés entre les mois de novembre 1979 et janvier 1980. Les résultats positifs de ce premier forage ont conduit à compléter le dispositif par un puits injecteur (GMY-2) réalisé quasiment un an après le premier puits (d'octobre à décembre 1980).

Entre temps, un forage d'exploration au Trias a été réalisé sur la commune de Cergy-Pontoise (95), la fin des travaux de forage étant intervenue en mai 1980.

Le doublet géothermique d'Achères (78) et le forage de Châteauroux (36 – puits de production unique), beaucoup moins profond (670 mètres), ont été réalisés peu de temps après (respectivement 1982 et 1983).

La Figure 1 permet de localiser ces quatre opérations au Trias sur une carte représentant l'extension et l'épaisseur des « réservoirs » du Trias au sein du Bassin Parisien (modifié de Bouchot et al., 2008).

Géographiquement, ces opérations se répartissent suivant une direction nord-sud au travers du bassin, avec une distance de l'ordre de 300 km entre les deux opérations de Cergy-Pontoise et d'Achères au nord, situées au cœur du bassin dans un secteur où le réservoir est profond mais peu épais (entre 50 et 100 mètres) car réputé en bordure de réservoir alors que l'opération de Châteauroux située plus au sud en périphérie du Bassin Parisien, dans un secteur proche des zones d'affleurement et donc moins profond. L'opération de Melleray se situe dans une zone intermédiaire en termes de profondeur, avec une épaisseur importante du réservoir triasique de l'ordre de 200 mètres.

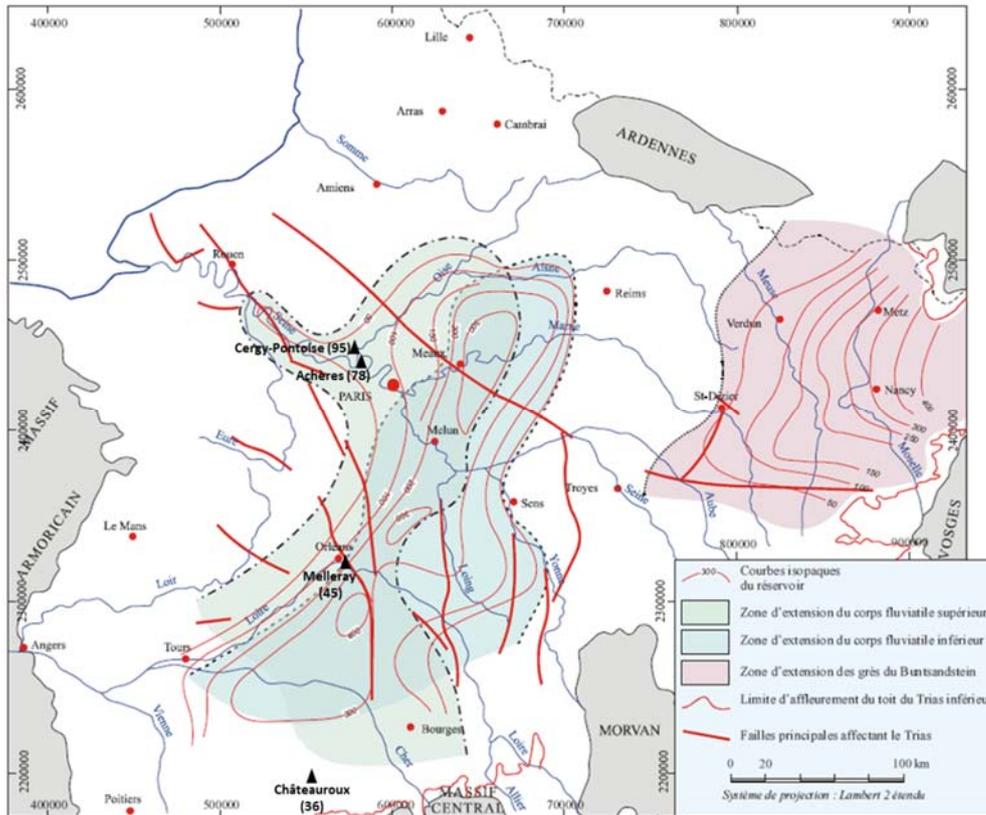


Figure 1 : Localisation des opérations géothermiques au Trias réalisées dans le BP et carte d’extension et d’épaisseur du réservoir.

2.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU RESERVOIR GEOTHERMAL

Dans le Bassin Parisien à l’ouest d’une ligne Reims-Sens-Nevers, **le réservoir triasique est constitué par des formations fluviatiles caractérisées par une alternance de dépôts sableux et argileux**. On distingue un « corps fluviatile supérieur » et un « corps fluviatile inférieur » (Figure 1).

Au sein de ce réservoir complexe (« Grès du Keuper »), le potentiel géothermique de cinq formations aquifères a été évalué dans le cadre du projet CLASTIQ (Bouchot et al., 2008 a), du plus favorable au moins favorable :

1. les Grès de Donnemarie (Muschelkalk et Keuper) ;
2. les Grès de Chaunoy (Keuper et Rhétien) ;
3. les Grès continentaux de Boissy (Keuper et Réthien) ;
4. les Grès de Sainte-Colombe-Voulzie (Keuper) ;
5. les Grès du Rhétien marin (Keuper et Réthien).

La Figure 2 présente globalement le potentiel géothermique du Trias à l’échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008). Elle met en évidence les potentiels les plus forts, en lien avec la profondeur du bassin (jusqu’à 2850 mètres), notamment dans le secteur « Brie – Champagne » à l’est de Paris (villes de Meaux, Epernay et Nogent-sur-Seine) et le secteur de Salbris au sud d’Orléans.

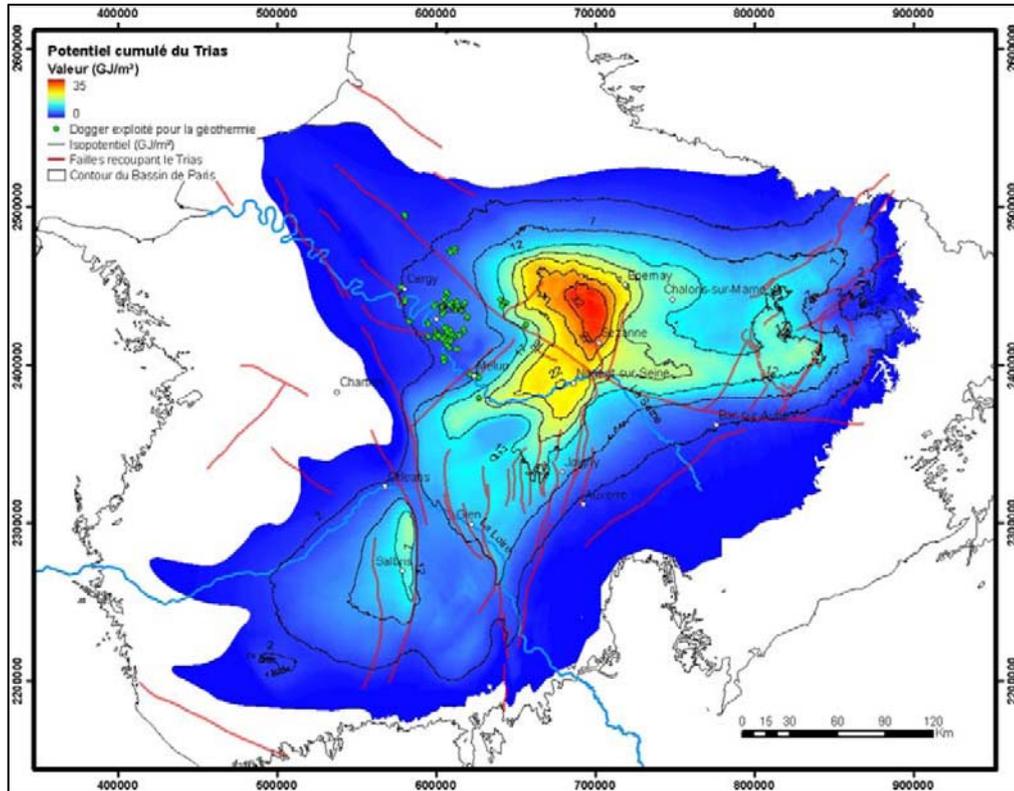


Figure 2 : Carte du potentiel géothermique du Trias à l’échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008).

Au niveau local, les caractéristiques principales du réservoir géothermique relevées aux puits producteurs des opérations au Trias sont reportées dans le tableau 1 ci-dessous.

Opération	Profondeur (m)	Température (°C)	Transmissivité (D.m)	Epaisseur totale / utile (m)
Melleray	1436	74	15,5	182 / 36
Cergy-Pontoise	1940	77	-	33
Achères	1890	78	11,2	67 / 15
Châteauroux	455	32	-	201 / 20

Tableau 1 : Caractéristiques principales du réservoir triasique au niveau des forages (source : DOE).

Comparativement au réservoir du Dogger (transmissivité entre 3 et 130 D.m avec une moyenne de 40 Dm) les valeurs de transmissivité des sites de Melleray et d'Achères sont relativement bonnes (tranche inférieure du Dogger exploité). Ces caractéristiques sont tout à fait comparables à celles correspondant au site de Copenhague (12 D.m, Annexe 1).

2.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES OPERATIONS AU TRIAS

Les caractéristiques techniques des opérations au Trias présentées dans ce chapitre sont extraites des Dossiers des Ouvrages Exécutés (DOE) des travaux de forage.

L'ensemble des informations collectées est reporté dans le tableau de synthèse présenté dans le chapitre 4 du rapport final de GUIDOCLAST.

Le doublet de Melleray (1980)

Réalisé dans la région d'Orléans (45) en 48 jours (du 23/11/1979 au 09/01/1980), le forage GMY-1 (1668,75 mètres de profondeur verticale) est le premier forage géothermique profond ayant atteint le réservoir du Trias dans le Bassin Parisien.

Suite aux résultats positifs de ce forage exploratoire vertical, destiné à être le puits producteur du doublet, le forage injecteur GMY-2 (1661 mètres de profondeur déviée) a été réalisé près d'un an après, en 40 jours (du 31/10/1980 au 09/12/1980), avec une architecture de puits différente :

- **déviations du forage GMY-2** à partir de 900 mètres de profondeur, avec une inclinaison maximale de 23° par rapport à la verticale permettant d'atteindre un écartement de l'ordre de 1050 mètres entre les impacts au réservoir des deux puits (distance d'environ 780 mètres entre les têtes de puits) ;
- **diamètres de foration et de tubage inférieurs à ceux de GMY-1** (forage du réservoir en 6" au lieu de 8"1/2 notamment).

Les coupes techniques des forages GMY-1 et GMY-2 de Melleray sont présentées sur la Figure 3.

Au cours du forage du puits GMY-1, un test de formation (financé par le Comité Géothermie du Ministère de l'Industrie) a été réalisé en trou ouvert au niveau du Dogger (Bathonien), révélant une transmissivité de ce réservoir beaucoup plus faible que prévue (0,14 D.m). Néanmoins, à la reprise du forage, une section à avancement rapide a été observée sans qu'elle n'est pu être prise en compte dans le test.

Les deux forages ont atteint le socle après avoir traversé les formations du Trias sur une épaisseur de 182 mètres (entre 1436 et 1618 mètres) pour le forage GMY-1 et 165 mètres (entre 1417 et 1582 mètres) pour GMY-2. **En l'absence de campagne sismique en amont du projet, il n'a pas été possible de préciser la structure géologique au droit du site de Melleray**, en particulier la position de la faille de Sennely (accident tectonique majeur du Bassin Parisien) qui limite une fosse profonde centrée sous la Sologne, près de la ville de Salbris.

Au forage GMY-1, le Trias est constitué par un complexe argilo-gréseux, débutant par des argiles bariolées, alternant avec des grès fins à grossiers, micacés à ciment argilo-dolomitique

renfermant des niveaux conglomératiques à gros galets de quartz et de quartzite. Quelques intercalations de dolomie et d'anhydrite ont également été signalées.

Les deux forages ont été équipés de crépine en Inox au niveau du réservoir (diamètres 6''5/8 pour GMY-1 et 4''1/2 pour GMY-2) avec des ouvertures (slots) de 0,8 mm. Derrière ces crépines, aucun massif filtrant n'a été mis en place.

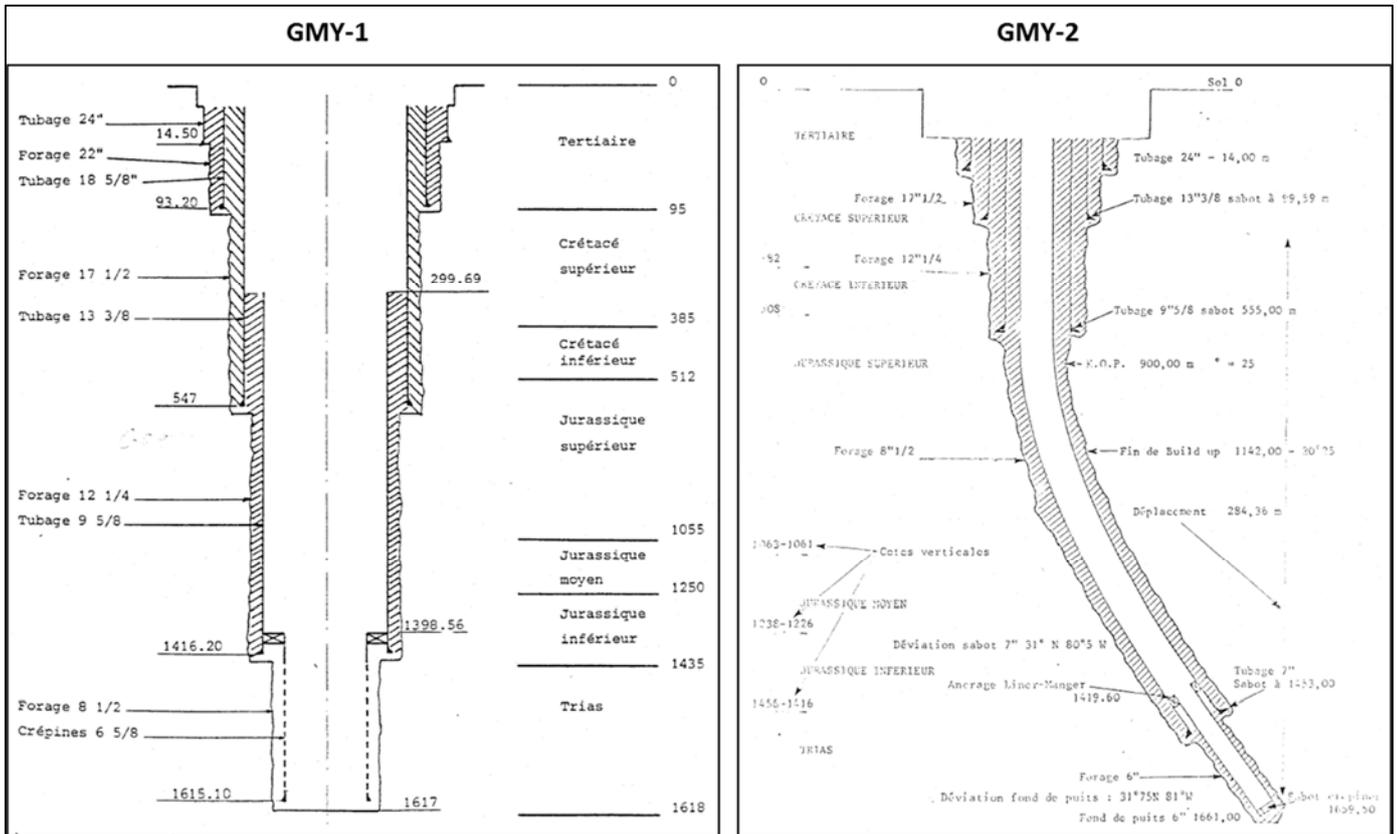


Figure 3 : Coupes techniques des forages au Trias de Melleray (GMY-1 et GMY-2).

Après la mise en place de la complétion, le forage GMY-1 a été nettoyé avec des agents dispersants (hexamétaphosphate). Le développement du réservoir poursuivi pendant 7 jours (du 25 au 31/01/1980) n'a pas apporté d'amélioration notable de la productivité du puits (Indice de Productivité de 10 m³/h/bar lors des essais préliminaires par air-lift) qui a néanmoins été jugée satisfaisante, malgré un **skin positif interprété comme l'existence d'un colmatage résiduel aux abords du puits**. Cette productivité permettait d'envisager un **débit d'exploitation de 175 m³/h** avec un rabattement de 200 mètres, compte tenu d'une pression artésienne de l'ordre de 6,5 bars et une profondeur de la chambre de pompage en 13''3/8 proche de 300 mètres. **La température de production a été mesurée à 79°C** au toit du réservoir et la salinité du fluide géothermal a été évaluée à 36 g/l.

Les caractéristiques du réservoir étaient sensiblement équivalentes entre les deux puits, avec une transmissivité de 15,5 D.m et une hauteur productrice de 36 mètres pour GMY-1 contre 13,2 D.m et 30 mètres pour GMY-2. Ces valeurs sont relativement bonnes par rapport aux valeurs connues pour les exploitations du Dogger (transmissivité de l'ordre de 10 à 100 D.m et épaisseur productrice moyenne de l'ordre de 20 mètres) fonctionnant à un débit de 300 m³/h.

L'interprétation de la remontée de pression lors des essais de production du puits GMY-2 a mis en évidence une anomalie pouvant être liée à la nature multi-couche du réservoir ou à l'existence d'une variation latérale de faciès. **Cette incertitude aurait pu être levée par un test de production de plus longue durée ou un test d'interférence entre puits.**

Après un an environ de fonctionnement, le puits injecteur gravement endommagé a été arrêté et l'abandon définitif du dispositif est intervenu à la fin des années 80.

Le forage d'exploration de Cergy-Pontoise (1980)

A Cergy-Pontoise, les travaux de forage du puits GCY-1 ont été réalisés entre les mois de mars et mai 1980 (fin des travaux le 04/05/1980), c'est à dire entre la réalisation des deux forages de Melleray.

Ce **forage d'exploration vertical**, destiné à être un puits de production (chambre de pompage), a atteint une **profondeur de 1997 mètres** et a traversé le Trias (foré en diamètre 8"1/2) entre 1940 et 1973 mètres, soit sur une **épaisseur réduite de 33 mètres**. Une **crépîne en Inox de diamètre 6"5/8** a été mise en place au niveau du réservoir, **avec des ouvertures (slot) de 1 mm**, supérieures à celles utilisées à Melleray (0,8 mm) et Achères (0,2 et 0,4 mm). Comme pour le dispositif de Melleray, **aucun massif filtrant n'a été mis en place**. La coupe technique de ce forage est présentée sur la Figure 4.

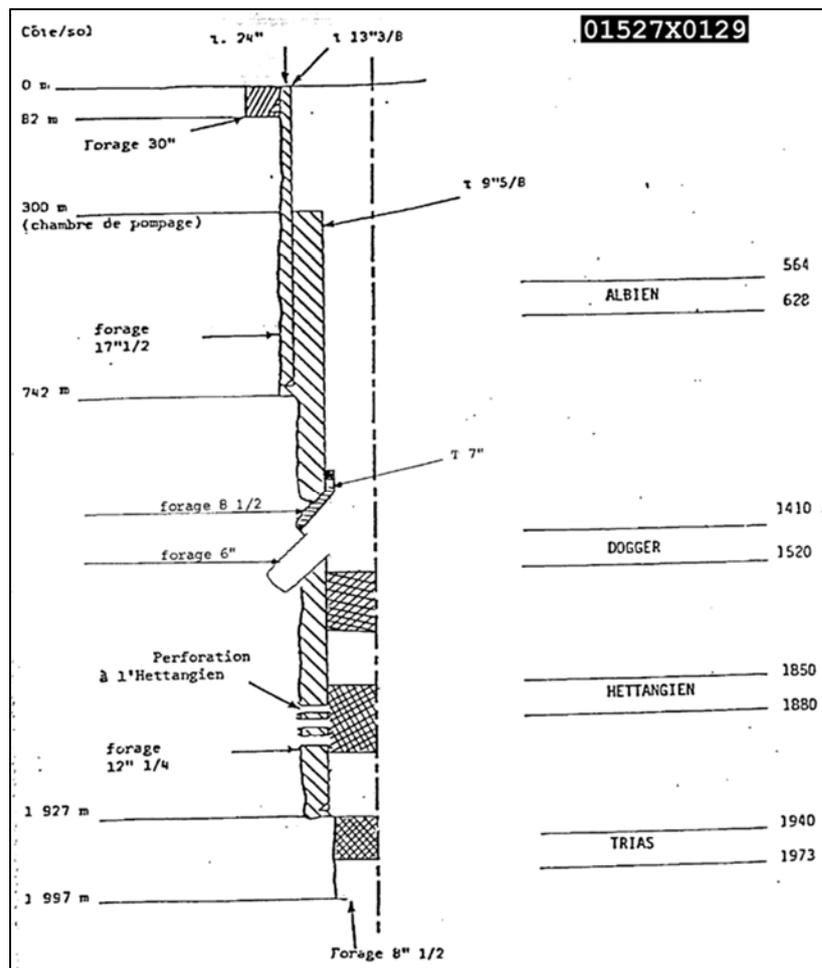


Figure 4 : Coupe technique du forage au Trias de Cergy-Pontoise (GCY-1).

Malgré une température de production élevée (77°C), les tests de formations ont révélé une productivité faible du réservoir ne permettant pas un débit d'exploitation supérieur à 70 m³/h (Boisdet et al., 1989).

Réalisé en gros diamètres, ce forage a pu être repris un an plus tard (du 1^{er} au 14 mars 1981) **en « side-track » au travers du tubage 9”5/8 pour capter le Dogger** aux environs de 1500 mètres de profondeur, avec un diamètre de foration en 6”.

Un second puits au Dogger (GCY-2) a été réalisé pour compléter le dispositif, le puits GCY-1 étant finalement utilisé comme injecteur. Ce doublet au Dogger a été mis en service en juillet 1982 pour chauffer 2800 logements et exploité jusqu'en 1991.

Le doublet d'Achères (1982)

Les forages géothermiques d'Achères (GTH-1 injecteur et GTH-2 producteur ¹) ont été réalisés successivement en 1982 : du 27/01/1982 au 21/05/1982 pour GTH-1 (soit sur une durée totale de 115 jours) et du 07/06/1982 au 22/08/1982 pour GTH-2 (soit sur une durée totale de 77 jours).

Destinés au chauffage de deux ensembles d'habitations à Achères, l'objectif initial du projet était de tester les réservoirs clastiques du Lias et du Trias en assurant, comme pour Cergy-Pontoise, **une solution de repli au Dogger en cas d'échec, mais cette fois par perforations**. L'opération s'est déroulée selon les phases suivantes (Boisdet et al., 1989) :

- réalisation du forage et des essais de production du premier puits au Trias : de janvier à mai 1982 ;
- réalisation des essais d'injection sur le premier puits : juin 1982 ;
- réalisation du forage et des essais de production du second puits au Trias : de juin à août 1982 ;
- pose d'un bouchon de ciment et perforations au niveau du Dogger sur chacun des puits.

Les forages GTH-1 et GTH-2 ont atteint respectivement les profondeurs de 1950 et 1961 mètres après avoir pénétré de quelques mètres dans les formations du Paléozoïque.

Distants d'environ 1,5 km, ces **deux forages verticaux présentent une architecture de puits différente**, avec un tubage intermédiaire en diamètre 9”5/8 descendu jusqu'au toit du Dogger pour le puits GTH-1, qui a été supprimé pour le puits GTH-2 où un **liner 7” couvre l'ensemble des formations depuis le Crétacé supérieur jusqu'au toit du Trias** (Cf. Figure 5).

Contrairement aux architectures des puits de Melleray et de Cergy-Pontoise, **l'architecture des puits d'Achères ne pourrait pas être reproduite aujourd'hui, compte tenu de la contrainte**

¹ Les dénominations GTH-1 et GTH-2 sont les termes figurant sur les DOE. Il semble qu'une révision des noms ait été faite ultérieurement (GACH-1 et GACH-2).

Je propose de laisser ces noms pour être en cohérence avec les DOE (et les noms des puits figurant sur les illustrations dont elles sont extraites) et de préciser dans le texte ou en note de bas de page que leur nom a changé depuis... ?

technique imposée par la protection renforcée de l’aquifère de l’Albien (double tubage au droit des formations du Crétacé inférieur).

L’architecture du puits producteur GTH-2 montre une **première évolution technique** du dispositif ciblant le Trias, **tenant compte de la productivité relativement faible du réservoir**, avec une **chambre de pompage plus profonde**, constituée par le tubage 13”3/8 descendu à **389 mètres** contre 300 mètres pour les puits producteurs de Melleray et de Cergy-Pontoise (Figure 3 et 4).

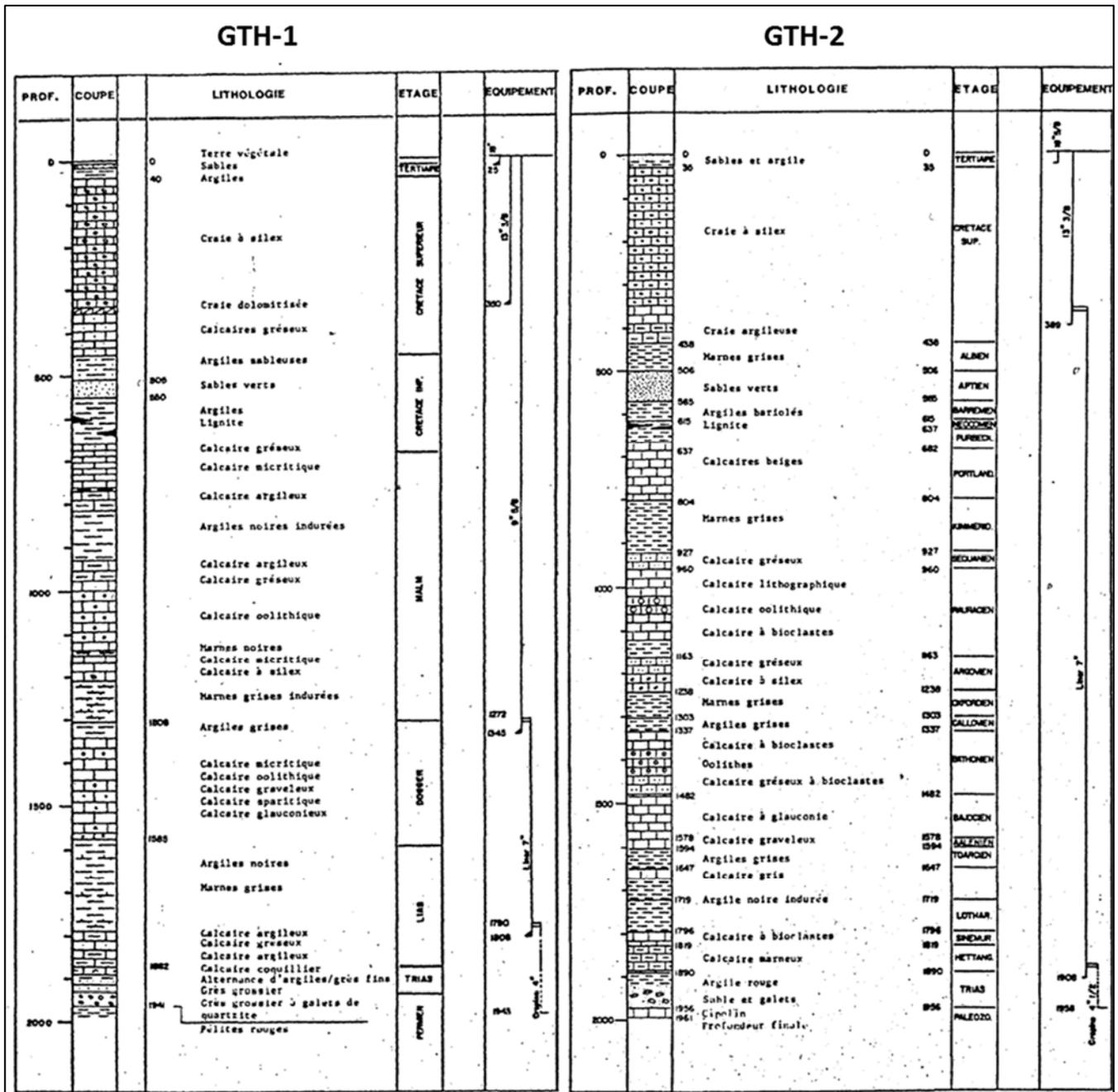


Figure 5 : Coupes techniques des forages au Trias d’Achères (GTH-1 et GTH-2).

La durée particulièrement longue des travaux de forage du premier puits exploratoire (115 jours) s'explique principalement par des **difficultés de contrôle du trou lors de la phase de forage du réservoir, avec des éboulements liés aux argiles du Keuper** qui ont nécessité la mise en place de bouchons de ciment et l'élargissement du trou. Au total, 43 jours ont été consacrés à ces problèmes de tenue des terrains.

Pour le forage GTH-2, ces problèmes ont été évités en descendant 100 mètres plus bas le sabot du liner 7" afin de couvrir les marnes du Keuper. Par contre, 8 jours ont été consacrés à des instrumentations dans le puits suite à la rupture de la garniture d'acidification à deux reprises.

Au niveau du Trias, les épaisseurs du réservoir relevées lors des forages GTH-1 et GTH-2 sont respectivement de 57 et 65 mètres. Elles sont constituées de haut en bas par des pélites rouges du Keuper et de la partie sommitale du Buntsandstein, puis par des niveaux de sables, d'argiles rouges et de sables plus grossiers à la base du Buntsandstein dans lequel se trouvent les niveaux producteurs identifiés par débitmétrie, avec des épaisseurs réduites à 10 mètres pour GTH-1 (de 1922 à 1932 mètres de profondeur) et 15 mètres pour GTH-2 (de 1892 à 1957 mètres de profondeur).

Cotes NGF en m.	Profondeurs verticales en m.	Épaisseurs en m.	Lithologie	Stratigraphie	
- 1 867	1 890	2	Calcaires sparitiques blancs, gréseux, lumachelliques et ligniteux	Rhétien	T R I A S
- 1 869	1 892	10	Pelites rouges à marbrures vertes et joints de friction limonitisés	Keuper	
- 1 879	1 902	10	Pelites rouges gréseuses à passées de sables et de graviers	Buntsandstein	
- 1 889	1 912	7	Sables et graviers		
- 1 896	1 919	6	Argiles rouges		
- 1 902	1 925	32	Sables plus ou moins grossiers à galets de quartzites	PALEOZOIQUE	
- 1 934	1 957	(4)	Calcaires recristallisés		
- 1 938	1 961	FOND DE PUIS			

Tableau 2 : Lithologie du réservoir au puits producteur d'Achères (GTH-2).

Les complétions mises en place pour les forages d'Achères montrent également une évolution nette par rapport aux réalisations antérieures de Melleray et de Cergy-Pontoise. L'équipement du puits producteur GTH-2 est présenté sur la Figure 6, au regard de la débitmétrie et de la lithologie du réservoir. Cette évolution est caractérisée par :

- l'élargissement du trou de **6" à 11" jusqu'à la base de la zone productrice** ;
- la mise en place d'un **massif filtrant (graviers) dans l'espace annulaire** ;
- la mise en place de crépines **en Inox de diamètre 4"1/2 avec des ouvertures (slots) de 0,2 mm et 0,4 mm** inférieures à celles utilisées à Melleray (0,8 mm) et Cergy-Pontoise (1 mm), mais qui restent néanmoins supérieures aux dimensions des grains de sable les plus fins (100 µm) et des pélites (taille des particules argileuses inférieure à 10 µm).

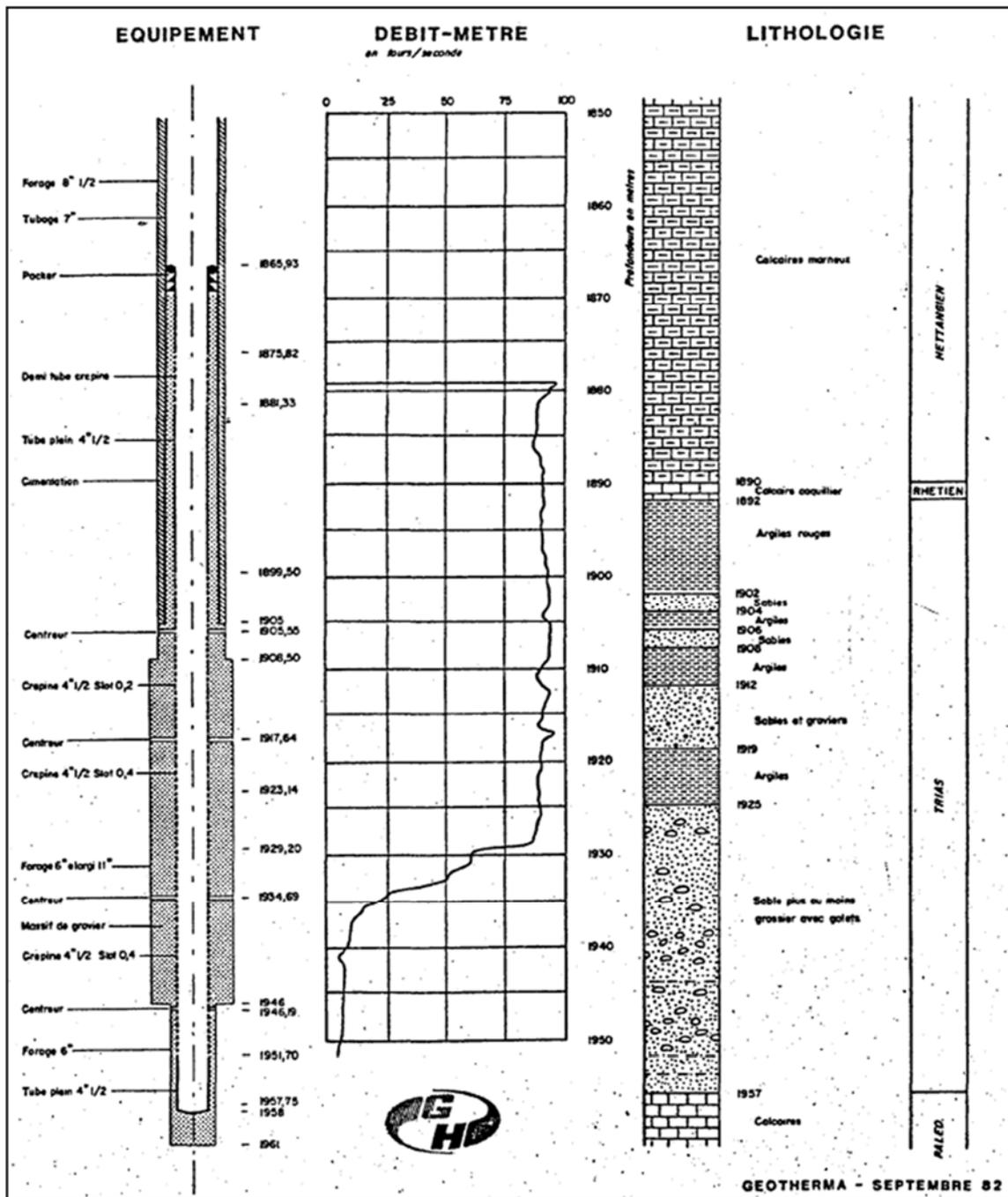


Figure 6 : Complétion du forage producteur d’Achères (GTH-2).

Enfin, la phase des essais réalisée à la fin des travaux de forage d’Achères montre une évolution des pratiques par rapport aux opérations antérieures, avec notamment un essai de **production de longue durée pour le forage producteur GTH-2 (5 jours du 10 au 14/08/1982) précédant un test d’interférences entre les deux puits (5 jours du 14 au 19/08/1982).**

Suivant l'interprétation de ces essais, **le réservoir est caractérisé par une « excellente perméabilité » avec une température élevée (78°C) mais une faible épaisseur des niveaux producteurs (10 et 15 mètres), le tout donnant des valeurs tout à fait acceptables de la transmissivité proche de 11 D.m.**

Pour le premier forage GTH-1, destiné à être le puits injecteur du doublet (pas de chambre de pompage), des essais de production et d'injection ont été réalisés successivement. Ils montrent une **forte dissymétrie du fonctionnement de l'ouvrage caractérisée par une productivité relativement correcte** (Indice de Productivité de 6,5 m³/h/bar) **et une mauvaise injectivité** (Indice d'Injectivité de l'ordre de 2 m³/h/bar) **remettant en cause sa fonction initiale d'injecteur**. Pour un débit injecté de 135 m³/h, une température du fluide de 31°C en tête de puits et une pression artésienne proche de 5 bars, la pression d'injection en tête de puits a été mesurée à une valeur proche de 72 bars.

Pour le second forage GTH-2 (producteur), les essais ont montré une très faible productivité de l'ouvrage (Indice de l'ordre de 2,4 m³/h/bar) remettant totalement en cause sa fonction de producteur. Selon l'interprétation présentée dans le rapport de fin de travaux (DOE), ce forage se trouverait dans une zone de moins bonne perméabilité (transmissivité équivalente mais épaisseur légèrement plus importante) dont il n'est pas possible de préciser l'extension. Le skin apparent de l'ouvrage (évalué entre +10 et +15, signe d'un développement du réservoir insuffisant) ne serait *« pas dû aux pertes de charge pariétales ou du voisinage immédiat du puits qui a été considérablement acidifié »*.

Compte tenu de ces résultats, la solution de repli au Dogger a été privilégiée.

Pour mémoire, le fluide géothermique prélevé lors de l'opération d'Achères a été caractérisé par une **salinité et une pression de dégazage (point de bulle) élevés, respectivement 93,6 g/l et 15 bars**. Cinq carottes ont été prélevées dans le réservoir au cours du forage GTH-1, mais la présence de galets importants a empêché le carottage au niveau des niveaux producteurs repérés entre 1922 et 1932 mètres de profondeur.

Le forage de production de Châteauroux (1983)

Le forage géothermique de Châteauroux est la dernière opération ciblant le réservoir du Trias dans le Bassin Parisien. **Cette opération est la seule à fonctionner encore aujourd'hui après environ 32 ans d'exploitation.** Beaucoup moins profond que les forages de Melleray, Cergy-Pontoise et d'Achères, car situés en périphérie du Bassin Parisien (Figure 1), la qualité de l'eau du réservoir (salinité inférieure à 0,3 g/l) a permis au Maître d'ouvrage d'exploiter cette ressource par un dispositif constitué uniquement d'un puits de production et de rejeter le fluide géothermique dans le milieu naturel. **Cette exploitation n'est donc pas concernée par le processus de réinjection.**

Destiné au chauffage d'environ 1500 équivalents-logements (cité Saint-Jean), ce **forage exploratoire vertical** a été réalisé en 59 jours du 12/02/1983 au 11/04/1983. Il a été arrêté à la **profondeur de 670 mètres** dans le socle, après avoir traversé les formations du Trias entre 482 mètres (32 mètres plus bas que prévu) et 656 mètres de profondeur (69 mètres plus haut que prévu), soit une **épaisseur du réservoir de 174 mètres**.

Au point de vue lithologique, le réservoir triasique comprend des grès grossiers compacts et recimentés non productifs à la base et un ensemble d'alternances d'argiles gonflantes, de sables

boulants et d'argiles sableuses. Les niveaux sableux à ciment calcaire situés entre 498 et 515 mètres ont montré une bonne capacité de stimulation à l'acide et une bonne productivité.

La coupe technique du forage est présentée sur la Figure 7.

Le rapport de fin de travaux de forage signale **les difficultés techniques importantes suivantes, liées à la nature géologique des terrains rencontrés**, qui expliquent la durée relativement longue des travaux compte tenu de la profondeur limitée du forage :

- au cours du forage, des **pertes partielles ou totales du fluide de forage** ont été rencontrées **au niveau des calcaires du Lusitanien et du Dogger** ;
- au niveau du réservoir, la **présence d'argiles gonflantes très instables a considérablement compliqué la mise en place de la complétion (crépine 5'' en acier inoxydable et massif filtrant)**.

D'autre part, **l'épaisseur du Trias (174 m) s'est avérée plus réduite que prévue** (250 à 300 mètres, soit une réduction de l'ordre d'un tiers), la profondeur du toit du socle (656 mètres) étant nettement inférieure aux prévisions. La conséquence principale étant la réduction, du même ordre de grandeur (1/3), du débit d'exploitation par pompage par rapport à une valeur prévisionnelle estimée entre 100 et 150 m³/h.

La profondeur de la chambre de pompage constituée par le tubage 13''3/8 est de 160 mètres. Au cours des essais de production assistée par air-lift, un **débit de 88 m³/h** a induit un rabattement de la nappe dans le puits de 170 mètres (Indice de productivité de l'ordre de 5 m³/h/bar), soit un niveau dynamique établi à 140 mètres (20 mètres au-dessus du fond de la chambre de pompage) compte tenu de la pression artésienne de l'ordre de 3 bars en tête de puits. Cette pression permettait d'obtenir un débit artésien évalué à 40 m³/h.

La température au niveau du réservoir a été mesurée à 32°C, ce qui représente un gradient géothermique de 4°C par 100 mètres de profondeur, supérieur au gradient moyen du Bassin Parisien (3°C / 100 m). Autre conséquence liée à la réduction de l'épaisseur du réservoir (et donc sa profondeur) par rapport aux prévisions : cette température correspond à l'hypothèse basse des valeurs prévisionnelles (32 à 42°C).

Afin d'éviter les opérations d'élargissage au niveau du réservoir (considérées par expérience plus compliquées et plus coûteuses que prévues), **le forage a été réalisé en diamètre 12''1/4 jusqu'au socle**.

Les diagraphies du réservoir (« FDC » pour la densité de formation et « CNL » pour la porosité), ont permis d'identifier et de localiser **a priori les principaux niveaux producteurs potentiels dans les niveaux sableux du Trias** situés entre 498 et 506 mètres **et par les calcaires de l'Infra-Lias sus-jacents** entre 455 et 482 mètres. Les niveaux conglomératiques attendus à la base du Trias se sont révélés absents.

Suivant le programme de travaux prévisionnels, le trou a ensuite été rempli de graviers, avec quelques difficultés (bouchage des tiges, pont de gravier,...), jusqu'à la profondeur de 466 mètres et un bouchon de ciment a été mis en place pour protéger le réservoir lors de la cimentation du tubage 9''5/8.

Le sabot du tubage 9''5/8 a été mis en place au-dessus des niveaux infra-liasiques (à 444 mètres de profondeur) afin d'optimiser la production et assurer une bonne cimentation du tubage sans endommager les niveaux sableux.

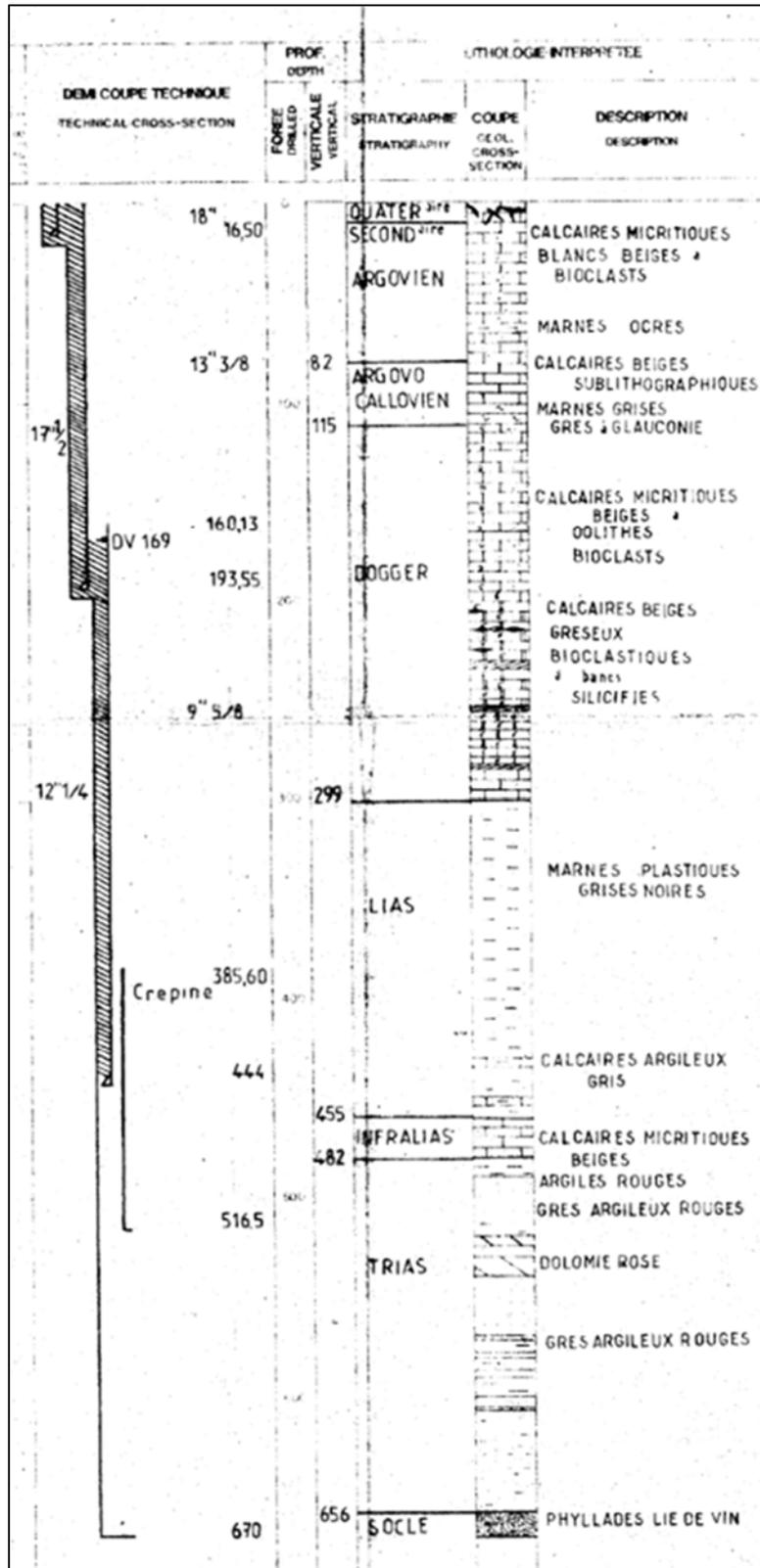


Figure 7 : Coupe technique du forage au Trias de Châteauroux.

L'opération suivante de reforage en diamètre 8''1/2 des accessoires de cimentation et d'extraction du gravier de remplissage s'est déroulée avec beaucoup de difficultés, liées au bouchage de l'outil à plusieurs reprises et à la **mauvaise tenue du trou au droit du niveau argileux situé entre le mur des calcaires de l'Infra-Lias et le toit des niveaux sableux du Trias.**

De même, la mise en place de la crépine et du massif filtrant ont été particulièrement difficiles, nécessitant plusieurs tentatives et quasiment deux semaines de travail. Au final, la crépine n'a pu être descendue qu'à 516,5 mètres de profondeur, condamnant les niveaux triasiques de la partie inférieure considérés comme peu productifs mais plus chauds.

Le réservoir a ensuite été nettoyé (hexamétaphosphate) puis stimulé par trois acidifications, et un essai de production de longue durée (12,5 heures) a été réalisé.

L'opération finale de contrôle de l'ouvrage a montré que les **crépines étaient bouchées au droit des niveaux sableux productifs par des éléments colloïdaux argileux et de sables très fins provenant du développement par air-lift.** Compte tenu du coût journalier de l'appareil de forage, les travaux ont été arrêtés (après la coupe du tubage 9''5/8 à 160 mètres de profondeur) et il a été proposé un programme d'essais complémentaires, avec du matériel plus léger, et une durée prévisionnelle des travaux supplémentaires estimée à 8 jours.

2.4. LE RETOUR D'EXPERIENCES DES OPERATIONS AU TRIAS : UN APPRENTISSAGE AVORTE MAIS RICHE D'ENSEIGNEMENTS

L'analyse du fonctionnement des opérations au Trias est principalement basée sur les synthèses présentées dans les rapports portant spécifiquement sur la problématique de réinjection dans le réservoir du Trias, en particulier pour le cas de Melleray (Boisdet et al. 1989, Lopez et al., 2008). Elle est complétée par notre réflexion faisant suite à l'analyse technique précédente.

Comme indiqué précédemment, **seule l'opération de Châteauroux fonctionne actuellement après 32 ans d'exploitation**, mais ce dispositif constitué d'un puits de production unique n'est **pas concerné par les problèmes de réinjection.** Ce forage permet d'alimenter en chauffage 1310 logements à partir de la ressource captée vers 500 mètres de profondeur, à une température de 32°C et un débit de l'ordre de 80 m³/h obtenu par pompage. Les **difficultés rencontrées au cours des travaux de forage** (pertes totales au Lusitanien et au Dogger) **et de la mise en place de la complétion** (argiles gonflantes très instables) sont à retenir en termes d'apprentissage pour la réalisation des travaux.

Les trois autres opérations ont été abandonnées rapidement en raison des problèmes principalement liés à la réinjection du fluide géothermal (doublets de Melleray et d'Achères) et / ou d'une productivité insuffisante à Cergy-Pontoise (un seul forage) remettant en cause l'exploitation géothermique de cette ressource. L'analyse des conditions d'arrêt de ces opérations présentée ci-dessous, permet de préciser les raisons ayant conduit à l'abandon des forages et de **relativiser dans une certaine mesure ces trois échecs apparents qui ont néanmoins confirmé le potentiel de la ressource géothermale.**

2.4.1. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray

D'un point de vue stratégique, les trois éléments ci-dessous sont à retenir :

- **L'échec relatif de ce projet industriel** visant à alimenter des serres **a causé un grave préjudice au Maître d'ouvrage, mais aussi à l'ensemble de la filière**, en particulier sur la région d'Orléans où, malgré de bonnes caractéristiques du réservoir (transmissivité de l'ordre de 13 à 15 D.m et température de 79°C), plus aucun projet de géothermie profonde n'a vu le jour depuis plus de trente ans. Ce point souligne **la nécessité de trouver des moyens permettant de réduire l'impact négatif d'un échec prévisible** compte tenu du caractère exploratoire de ce type d'opération.
- **En termes de structuration du projet**, le doublet de Melleray a été réalisé pour le compte d'un groupement d'intérêt économique (GIE Géoval) qui fédérait différents exploitants des serres. **Cette organisation a eu une incidence sur la gestion du projet par des délais relativement longs dans les prises de décisions d'ordre technique, et des conséquences économiques négatives** comportant notamment des pertes d'exploitation supplémentaires liées à des consommations de fuel (Boisdet et al., 1989). **Cet aspect organisationnel est donc à prendre en compte en amont du projet afin de faciliter le déroulement des opérations et optimiser les chances de succès.**
- L'absence d'une étude géophysique préalable n'a pas permis de préciser la structure géologique au droit du site de Melleray et en particulier la position de la faille de Sennely (accident tectonique majeur du Bassin Parisien). D'autre part, l'anomalie relative au comportement hydraulique du réservoir, révélée lors des essais de production du puits injecteur GMY-2, n'a pas été clairement identifiée (nature multi-couche du réservoir ou variation latérale de faciès, comportement hydraulique de la faille de Sennely ?). Ces points soulignent la **nécessité d'études complémentaires en amont du projet (sismique) et en fin d'opération de forage (essais hydrogéologiques) afin d'améliorer la connaissance du réservoir cible pour optimiser les chances de succès de l'exploitation.**

D'un point de vue technique, la conception du doublet de Melleray fait apparaître des choix techniques forts, portant notamment sur :

- L'affectation de la fonction des puits producteur et injecteur (déterminée par la réalisation de la chambre de pompage) avant la réalisation des travaux et des essais.
- La réduction des diamètres des tubages et de la complétion du puits injecteur suite aux résultats encourageants du premier puits producteur.
- L'absence de massif filtrant au niveau de la complétion du réservoir.

Ces choix techniques ont très probablement réduit les chances de succès de l'opération de Melleray compte tenu notamment de la très forte sensibilité de la pression d'injection par rapport à la valeur de l'indice d'injectivité. Une valeur d'indice de 4 m³/h/bar légèrement supérieure à celle mesurée au puits injecteur GMY-2 (2 m³/h/bar) aurait potentiellement permis de fonctionner au débit d'exploitation prévisionnel de 150 m³/h, avec une pression d'injection de l'ordre de 37,5 bars nettement inférieure à la pression de 58 bars limitant le débit à 110 m³/h.

Ces points soulignent la nécessité de **conserver une flexibilité relative à l'affectation de la fonction des puits** (producteur, injecteur) suivant les caractéristiques hydrogéologiques les plus favorables du réservoir, et de **prévoir une complétion au diamètre le plus grand possible** (réduction des pertes de charge) **équipée d'un massif filtrant.**

En termes d'exploitation, les éléments suivants concernant notamment le **problème d'injection** de la saumure dans le réservoir sont à retenir.

Les problèmes d'exploitation du doublet de Melleray seraient apparus dès la mise en service du dispositif, avec des **pannes des pompes de production qui auraient masqué dans un premier temps les problèmes d'injection** (Boisdet et al., 1989).

Selon les auteurs, la **pompe d'injection aurait été sous-dimensionnée** d'une part, et d'autre part les problèmes d'injection initiaux auraient été minimisés par des **difficultés de mesure du débit en régime diphasique**. Ce dernier point sous-entend que le mode de fonctionnement de la pompe d'exhaure ne permettait pas de maintenir le fluide dans la boucle géothermale à une pression supérieure à celle du point de bulle (12,2 bars à Melleray) et qu'une fraction gazeuse devait donc être réinjectée dans le réservoir.

Début 1982, la **pression d'injection était de 58 bars en tête de puits, limitant le débit maximal d'exploitation à 110 m³/h** (soit un faible Indice d'injectivité de 1,9 m³/h/bar) par rapport au débit prévisionnel de 150 m³/h et au débit potentiel de production de 175 m³/h compte tenu des essais réalisés sur le puits producteur GMY-1.

Ces points soulignent la nécessité de **prévoir une adaptation des moyens de production et d'injection afin d'optimiser l'exploitation**, sachant que le fonctionnement au sein de la boucle géothermale à une pression hydraulique supérieure à celle du point de bulle du fluide géothermal est un principe généralisé aujourd'hui pour les exploitations au Dogger notamment.

Afin de résoudre les problèmes d'injection, des tests ont été réalisés en mai et juin 1982. Des essais de production menés sur le puits injecteur GMY-2 ont tout d'abord montré que ce puits n'était pas dégradé (Boisdet et al., 1989). **Lors des essais d'injection, l'ouvrage a ensuite été gravement endommagé suite à « un colmatage soudain, brutal et définitif »** caractérisé par la chute rapide de l'indice d'injectivité liée à une augmentation soudaine du facteur de skin de 0 à +28,5 (Lopez et al., 2008).

La déstabilisation du réservoir, suite à l'arrêt de l'injection ou au doublement du débit réalisé de manière brutale au cours du test, serait l'hypothèse la plus probable pour expliquer l'endommagement du puits injecteur de Melleray.

Le déplacement brusque d'éléments fins, en suspension dans le réservoir, provoqué par cette déstabilisation pourrait effectivement expliquer le colmatage soudain du puits injecteur, plutôt qu'un phénomène progressif lié à l'augmentation de la pression locale du gisement liée à son extension, ou à l'obstruction progressive de la porosité des niveaux producteurs par l'accumulation de particules fines provenant du puits producteur ou de la corrosion des éléments de la boucle géothermale. D'autre part, la description du phénomène de colmatage brusque suite à l'arrêt d'injection serait similaire à celle correspondant à des cas observés dans l'industrie pétrolière en Mer du Nord (Lopez et al., 2008).

La présence constatée en fond de puits de débris constitués de plaquettes d'oxydes de fer (pouvant atteindre 25 mm²) et de grains de sable dont le diamètre était parfois supérieur à l'ouverture des crépines (0,8 mm) pourrait être liée à la **corrosion des canalisations de surface (longue de plus d'un kilomètre)** et dans une certaine mesure à l'endommagement des crépines.

Suite à cet incident, le puits injecteur a dû être abandonné provisoirement malgré des tentatives de décolmatage. **La solution de remédiation proposée** (alésage au niveau du réservoir et mise en place d'une nouvelle complétion adaptée avec massif filtrant) **n'a pas été réalisée**.

Ces points soulignent la nécessité de :

- **Sensibiliser le personnel d'exploitation vis-à-vis des modifications du régime de débit**, en respectant un principe de précaution lors des opérations de redémarrage et d'arrêt des installations (procédures à définir) afin d'éviter les changements brutaux (coup de bélier). Ce problème persiste néanmoins en cas de pannes subites des pompes équipant la boucle géothermale.
- **Prévoir si possible une implantation des têtes de puits les plus proches possibles de la centrale géothermique** afin de limiter les longueurs de canalisation, sachant que le principe de traitement chimique continu contre les phénomènes de corrosion est aujourd'hui généralisé à l'ensemble des exploitations du Dogger. La nature du traitement resterait néanmoins à être adaptée au fluide du Trias.
- **Prévoir financièrement une opération de décolmatage, voire de reprise de la complétion, en cas de forte dégradation des caractéristiques hydrauliques des puits ou d'avarie importante.**

Le doublet de Melleray a été abandonné définitivement à la fin des années 80, une autorisation provisoire de rejet dans la Loire ayant été accordée au Maître d'ouvrage pendant l'exécution d'un programme de recherches approfondi, visant à comprendre les facteurs limitant l'injectivité dans les aquifères argilo-gréseux et à définir les conditions pérennes d'exploitation par doublet (Boisdet et al., 1989).

Sur la base d'expérimentations de percolation de fluide à travers des carottes de matériaux artificiels et de grès naturels plus ou moins argileux, ce **programme de recherches a notamment permis d'identifier les causes de colmatage du réservoir pouvant avoir des effets brutaux**, en distinguant les causes intrinsèques au réservoir (nature lithologique et géométrie des pores) et celles qui résultent de l'exploitation (conséquences du dégazage : colmatage par des bulles de gaz, augmentation de la pression d'injection dû à l'allègement de la colonne diphasique, précipitations d'espèces chimiques).

Le protocole de traitement du fluide géothermal présenté dans les conclusions du rapport final (Boisdet et al., 1989) est reporté ci-dessous.

Le traitement physique et chimique du fluide comprendrait successivement :

- **son dégazage à pression** atmosphérique avec séparation de la phase gazeuse, les risques liés au dépôt étant minimisés si le dégazage est réalisé après les échangeurs de chaleur ;
- **son oxydation** permettant l'agrégation de fines particules colloïdales (l'eau de Javel étant un bon oxydant induisant une réaction rapide et contrôlée) ;
- **sa décantation** afin d'éliminer les particules les plus denses ;
- **sa filtration.**

Ce traitement devrait être complété par **l'injection d'inhibiteurs de corrosion et de croissance cristalline** (carbonates). **Un pilote de traitement permettrait de tester à débit continu l'efficacité du traitement et d'ajuster les paramètres à contrôler.** Ce protocole de traitement pourrait être une solution au problème de dégradation de l'injectivité, sachant qu'il n'a pas pu être mis en place sur les opérations au Trias puisque postérieur à leur abandon.

Ce protocole qui prévoit l'**oxydation du fluide** pour ensuite permettre une décantation et une filtration, est à comparer techniquement et économiquement au **système d'injection d'azote généralisé au Danemark et aux Pays-Bas qui vise au contraire à éviter l'oxydation du fluide**.

2.4.2. Principaux enseignements des opérations de Cergy-Pontoise et d'Achères

Les cas de Cergy-Pontoise et d'Achères, apportent moins de commentaires dans la mesure où **la solution privilégiée de repli au Dogger n'a pas permis de tirer les leçons de l'exploitation du Trias**. En ce sens, la solution de repli immédiat vers un réservoir supérieur connu constitue un frein au développement des connaissances relatives à l'exploration et à l'exploitation de nouvelles ressources géothermales.

D'autre part, pour le doublet d'Achères, la réflexion portant sur l'affectation *a priori* de la fonction des puits faite pour Melleray est similaire.

Compte tenu des valeurs de productivité du forage GTH-1 (conçu pour répondre à une fonction d'injecteur, sans chambre de pompage), et sans remettre en cause l'interprétation des essais concernant le forage GTH-2 (identification des causes expliquant la valeur du facteur de skin très élevée), **le forage GTH-1 aurait pu en effet être utilisé comme puits producteur** en prévoyant l'aménagement d'une chambre de pompage à une profondeur équivalente à celle réalisée pour le puits GTH-2 (389 mètres). Compte tenu de sa transmissivité, le puits GTH-1 aurait potentiellement pu permettre **d'atteindre un débit d'exploitation de l'ordre de 200 m³/h** (induisant un niveau dynamique de la nappe proche de 270 mètres sous le niveau du sol) **et une puissance thermique de l'ordre de 10 MW**.

Compte tenu de la mauvaise productivité du puits GTH-2 (producteur), ce puits n'aurait par contre pas pu être converti en injecteur. **La résolution du problème lié à la réinjection du fluide pourrait alors passer par le développement de nouvelles techniques ou pratiques pouvant potentiellement être combinées** et qui, à ce stade de l'étude, seraient :

- la stimulation et le développement du réservoir ;
- le forage en déviation au niveau du réservoir afin d'augmenter les longueurs traversées dans les niveaux producteurs ;
- la réalisation de drains multiples dans le réservoir ;
- la réinjection dans l'aquifère du Dogger sus-jacent.

3. Analyse technique des opérations géothermiques ciblant les aquifères multi-couches de l'Albien / Néocomien (Crétacé inférieur)

Couvrant près des 2/3 du Bassin Parisien et situés à une profondeur moins importante que celle du Dogger, les aquifères de l'Albien / Néocomien représentent une ressource géothermale plus facilement accessible (réduction du risque et du coût des opérations de forage) avec une température de l'ordre de 28 à 38°C nécessitant la mise en place d'équipements complémentaires (Pompes à Chaleur - PAC).

Ce réservoir bénéficie d'une très bonne connaissance (géologie, hydrogéologie et géochimie) avec un long historique d'exploitation (premier forage d'eau réalisé en 1841) et une base de données importante constituée par environ 3000 forages ayant atteint au moins le Crétacé inférieur dans le Bassin Parisien.

Bien protégée des pollutions de surface au centre du bassin où le recouvrement peut atteindre 1000 mètres d'épaisseur, la nappe est de très bonne qualité. Elle constitue une **réserve stratégique d'eau potable** à l'échelle de la région Ile-de-France et du bassin Seine Normandie avec une réserve évaluée à environ 700 milliards de m³ (SIGES Seine Normandie). A ce titre, en cas de crise majeure, les forages géothermiques ciblant l'Albien / Néocomien doivent pouvoir servir de puits de secours. La définition des conditions d'accès à la ressource géothermique des nappes de l'Albien et du Néocomien, et plus particulièrement les contraintes techniques imposables aux dispositifs de mobilisation de la ressource ont été présentées dans le rapport technique BRGM/RP-55990-FR (Hervé, 2007).

Quatre opérations de géothermie profonde exploitent actuellement le réservoir de l'Albien / Néocomien, avec chronologiquement une première réalisation à Paris (75) datant de 1989 (« Tours AGF » - Mirabeau et Crystal), puis trois opérations plus récentes de 2011 à 2014 : doublets d'Issy-les-Moulineaux (92), du Plessis-Robinson (92) et de la ZAC Clichy-Batignolles à Paris (75).

Ces dispositifs sont concentrés dans un rayon de 10 km au cœur du Bassin Parisien, dans les secteurs ouest et sud-ouest de la ville de Paris (Figure 8).

La carte piézométrique de la Figure 8 (Vernoux, 1997) indique un sens d'écoulement général de la nappe convergeant vers Paris, depuis les zones d'affleurement en périphérie du bassin (surface verte), puis suivant l'axe de la Seine. Les opérations géothermiques se trouvent dans le dôme de dépression piézométrique (entre les isopièzes +20 et +30 mètres NGF) marqué par l'exploitation intense de l'Albien en région parisienne. Dans ce secteur où la nappe est captive, la tendance piézométrique est caractérisée par une chute globale en 1984, puis une atténuation suivie d'une remontée progressive depuis 1992 du fait des diminutions des prélèvements (SIGES Seine Normandie).

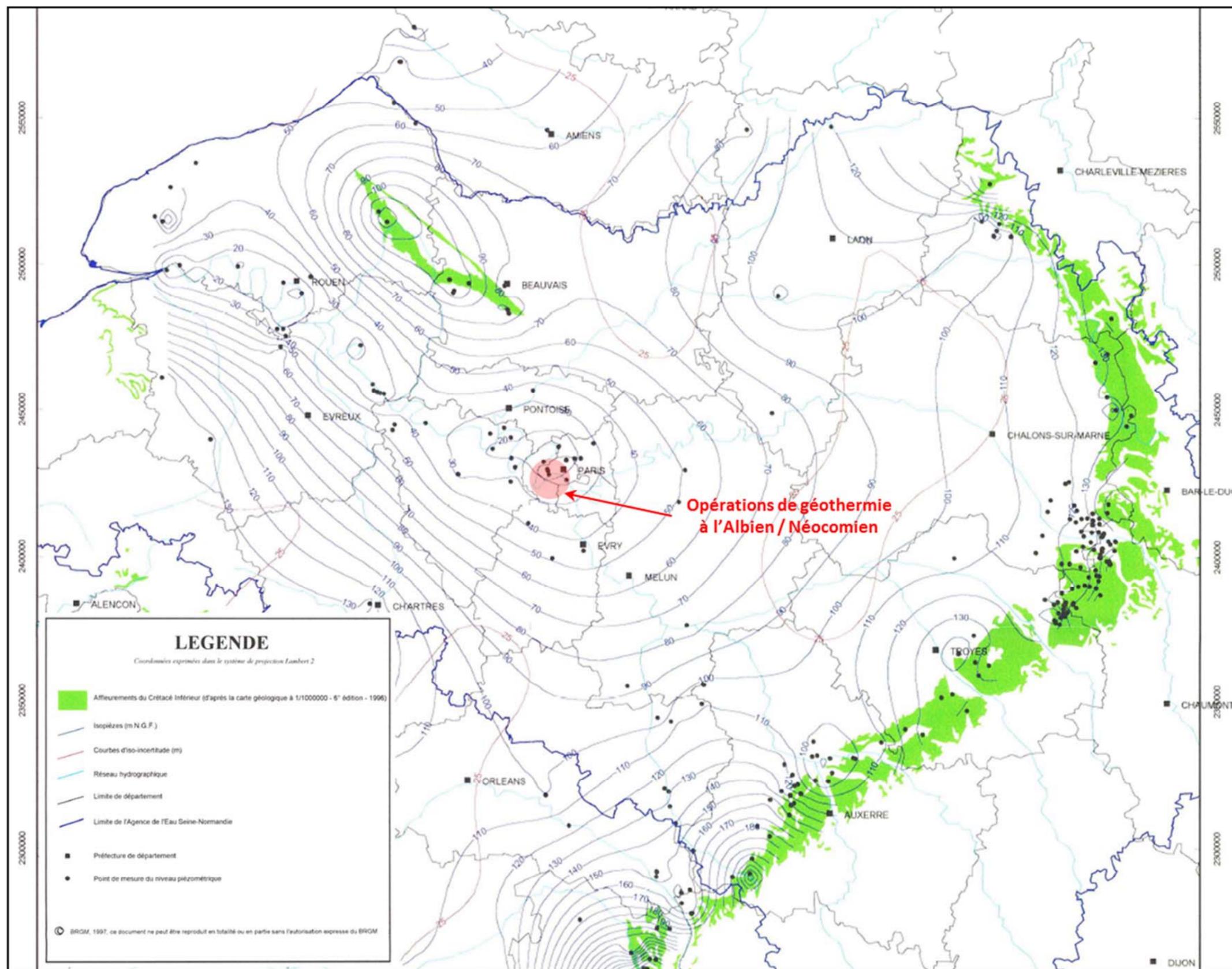


Figure 8 : Localisation des opérations de géothermie à l'Albien / Néocomien au centre du Bassin Parisien et piézométrie de la nappe (Vernoux, 1997)

3.1. IDENTIFICATION ET LOCALISATION DES OPERATIONS

La carte de la Figure 9, extraite de la synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du Bassin Parisien (Vernoux, 1997), permet de préciser la localisation des opérations géothermiques et le positionnement des forages ayant atteint le réservoir à proximité.

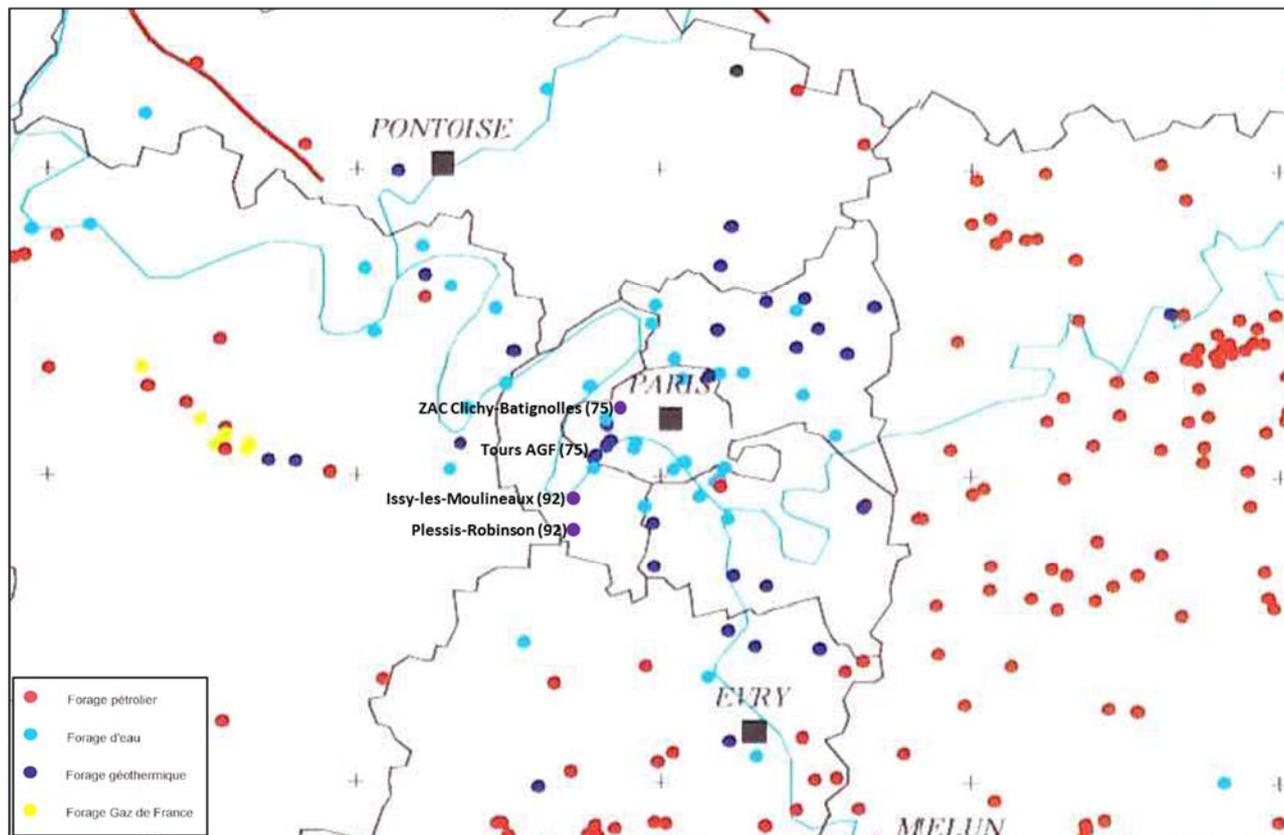


Figure 9 : Localisation et identification des doublets géothermiques à l'Albien / Néocomien (Vernoux, 1997).

La première opération de géothermie ciblant l'aquifère de l'Albien date de 1989, avec la réalisation de deux forages utilisés pour le chauffage et la climatisation des bureaux des tours « AGF » (Mirabeau et Crystal) situées quai André Citroën à Paris (15^{ème} arrondissement). Un forage vertical (forage B16 – Tour Crystal) stocke les calories (puits chaud) fournies par la climatisation en été, un forage dévié (B20 – Tour Mirabeau) stocke des frigories (puits froid) produites par des pompes à chaleur en hiver (Lopez et al., 2008).

Par la suite, **trois doublets ont été réalisés successivement entre 2011 et 2014 afin d'alimenter des réseaux de chaleur** :

- à Issy-les-Moulineaux, où les opérations réalisées entre juin 2011 et décembre 2012 ont ciblé l'aquifère de l'Albien ;
- au Plessis-Robinson en 2012 qui capte l'aquifère plus profond du Néocomien ;
- à Paris (17^{ème} arrondissement) et la ZAC de Clichy-Batignolles en 2014 qui capte l'aquifère de l'Albien.

3.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU RESERVOIR GEOTHERMAL

Bien que séparés par les formations de l'Aptien et du Barrémien à dominante argileuse, les aquifères de l'Albien et du Néocomien sont en communication hydraulique au sein du bassin sédimentaire. A cette échelle, ils se comportent comme un système hydrogéologique unique constitué d'aquifères multi-couches. Suivant l'ensemble de la structure du bassin, la zone la plus profonde se situe au centre de la Brie dans le secteur de Meaux et Melun (77).

L'aquifère de l'Albien est constitué de trois formations sableuses (Sables de Frécambault, Sables des Drillons et Sables verts) plus ou moins bien séparées par des formations semi-perméables. **La granulométrie moyenne des sables de l'Albien varie entre 0,1 et 0,4 mm** (Hervé, 2007). Selon les résultats de travaux de modélisation hydrodynamique récents (2000) de la nappe (source : SIGES Seine Normandie), son alimentation proviendrait à 45% de la recharge au niveau des zones d'affleurement, par drainance ascendante du Néocomien (8%) et descendante du Cénomanien sableux (11%) et de la Craie (35 %). Sous le niveau des argiles du Gault, l'aquifère est captif au centre du bassin et la nappe peut encore être artésienne dans les zones peu exploitées. A noter, qu'une étude plus récente sur la modélisation hydrodynamique des nappes de l'Albien et du Néocomien a été publiée par le BRGM en 2015 (Seguin et al., 2015).

Intégrant les formations attribuées aux étages géologiques de l'Hauterivien, du Valanginien et du Berriasien, **l'aquifère du Néocomien, plus profond**, est constitué de séries argilo-sableuses plus ou moins bien individualisées montrant d'importantes variations latérales de faciès. **La granulométrie des sables du Néocomien est généralement inférieure à celle de l'Albien**. Sa perméabilité est irrégulière et fonction du taux d'argilosité des niveaux sableux. La nappe est captive et sans affleurement dans le Bassin Parisien.

Du point de vue hydrogéologique, l'Albien montre les plus grandes valeurs de transmissivité (entre 10^{-3} et 10^{-2} m²/s, soit 100 à 1000 D.m) en région parisienne. Les faibles transmissivités s'observent dans les secteurs où l'épaisseur cumulée de sable est faible. Les transmissivités du Néocomien sont plus faibles (valeurs inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s, soit 200 D.m). Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-4} en zone captive pour les deux aquifères. La salinité du fluide géothermal est inférieure à 1,5 g/l sur l'ensemble du bassin. La teneur en fer est très souvent supérieure à la norme de potabilité (Vernoux et al., 1997).

Au niveau local, les caractéristiques principales du réservoir géothermal relevées lors des opérations ciblant l'Albien / Néocomien sont reportées dans le tableau 3.

Opération	Profondeur (m)	Température (°C)	Transmissivité (m ² /s)	Epaisseur totale / utile (m)
Paris - Tours AGF (Albien)	520	27	3 à $5,3 \cdot 10^{-3}$ (300 à 530 D.m)	67 / 37
Issy-les-Moulineaux (Albien)	625	30,8	$6 \cdot 10^{-3}$ (600 D.m)	97 / 50,2
Plessis-Robinson (Néocomien)	995	38,6	$2 \cdot 10^{-3}$ (200 D.m)	121 / 27,2
Paris - ZAC Batignolles (Albien)	650	28,5	2 à $3 \cdot 10^{-3}$ (200 à 300 D.m)	82 / 37,6

Tableau 3 : Caractéristiques principales du réservoir Albien / Néocomien (source : DOE).

3.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES OPERATIONS

Le doublet des Tours AGF (Mirabeau et Crystal) à Paris (1989)

Le doublet géothermique des Tours AGF à Paris (15^{ème} arrondissement) est constitué par un forage vertical (forage B16 – Tour Crystal) et un forage dévié (B20 – Tour Mirabeau). Les coupes techniques de ces ouvrages sont présentées sur la Figure 10 (source : Base de données du Sous-Sol - BSS). Le réservoir capté correspond aux niveaux sableux de l'Albien.

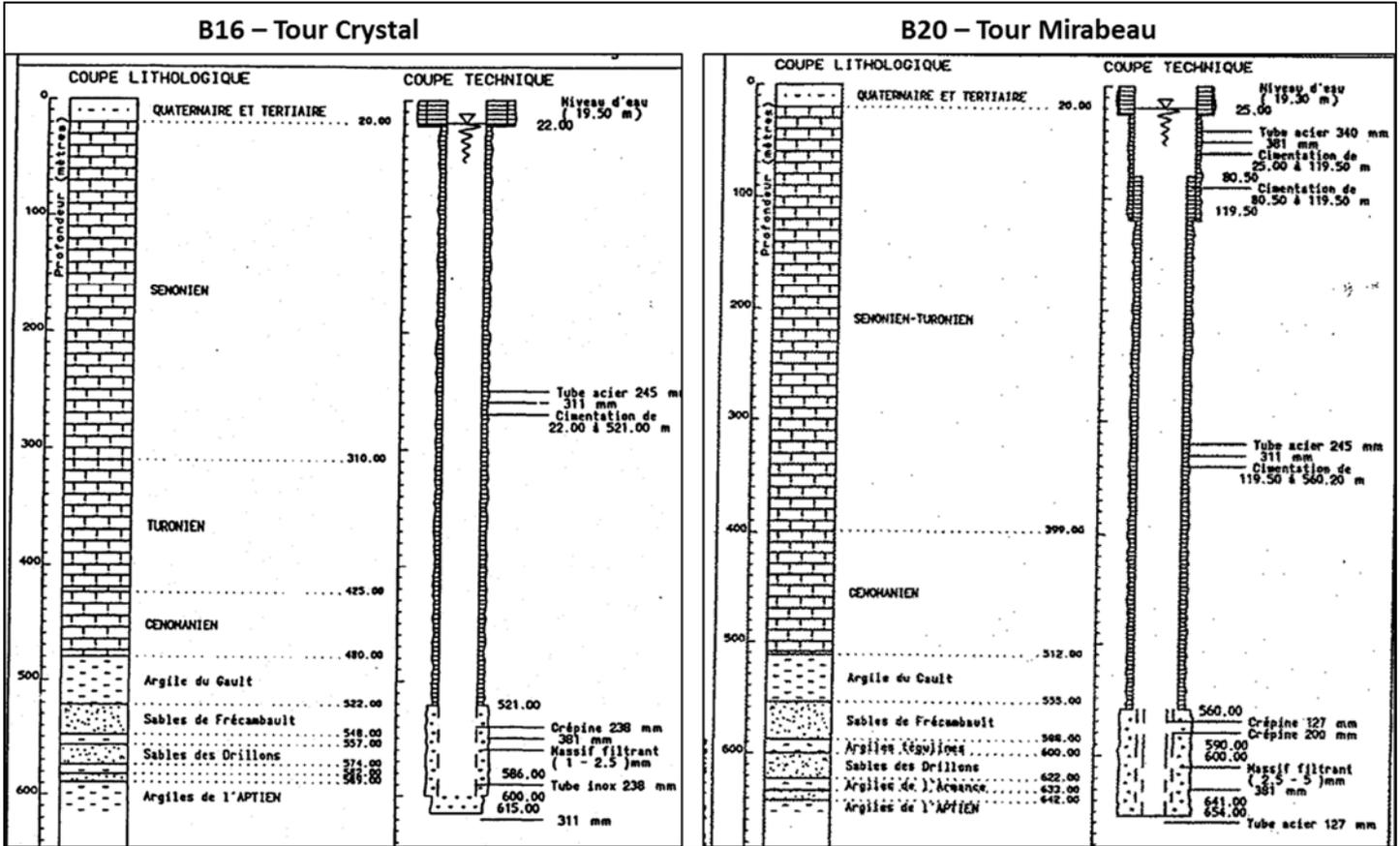


Figure 10 : Coupes techniques des forages à l'Albien des tours AGF (Crystal et Mirabeau).

NB : la coupe technique du puits B16 comporte une erreur concernant les diamètres de forage et de tubage pour la section comprise entre la surface et 521 mètres de profondeur. Le forage a été réalisé en diamètre 17"1/2 (445 mm et non 311 mm) et un tubage 13"3/8 (339,725 mm et non 245 mm) a été mis en place à 521 mètres et cimenté sur toute sa hauteur.

Les travaux de forage ont été réalisés successivement entre le 17/07/1989 et le 20/09/1989 pour le puits B16 (durée totale de 66 jours), puis entre le 30/09/1989 et le 30/11/1989 pour le puits B20 (durée totale de 62 jours). Pour chacun des puits, **les travaux de forage ont été interrompus un peu plus de deux semaines**, entre les phases de forage et de complétion (réalésage au niveau du réservoir et mise en place des crépines), **afin de dimensionner les équipements des forages.**

Les forages B16 et B20 ont été arrêtés dans les formations argileuses de l'Aptien, respectivement à des profondeurs de 615 mètres (cote verticale).

Outre la **dévi**ation du **second forage**, orientée vers le sud-ouest (azimut 214,6°) et **fortement inclinée (valeur maximale : 40°)** induisant un déplacement horizontal de 204 mètres à la profondeur de 560 mètres, les architectures des puits sont différentes :

- sous les formations récentes (Quaternaire et Tertiaire), le puits B16 a été foré en diamètre 17''1/2 jusqu'au toit du réservoir et un tubage 13''3/8 a été mis en place pour couvrir l'ensemble de la section. Pour le forage B20, cette même section a été forée en deux phases (15'' puis 12''1/4) et des tubages 13''3/8 et 9''5/8 ont été mis en place afin d'isoler probablement la partie sommitale aquifère de la craie du Sénonien.
- en conséquence, le forage du réservoir a été réalisé en diamètre 12''1/4 pour le puits B16 et en 8''1/2 pour le puits B20. Un **alésage en 15''** a ensuite été réalisé pour les deux forages au niveau du réservoir.

Le réservoir a été équipé d'une **complétion comportant une colonne de captage pré-gravillonnée (calibre de 1 à 2,5 mm) à double paroi en acier inoxydable**, avec une paroi intérieure à fil enroulé de diamètre 5'' et une paroi extérieure à nervures repoussées de diamètre 8''. Les espaces annulaires ont été comblés par des graviers siliceux calibrés de 1 à 2,5 mm pour le puits B16 et de 2,5 à 5 mm pour le puits B20. **Les ouvertures des crépines (slots) sont de dimension légèrement inférieure au puits B20 (0,75 mm au lieu de 0,8 mm).**

Ces dimensions restent nettement supérieures à la granulométrie des sables du réservoir (de l'ordre de 0,2 mm) et *a fortiori* des particules argileuses, **ce qui induit nécessairement une entrée d'éléments fins dans la boucle géothermale.**

Sous les argiles du Gault (Albien), le réservoir présente une épaisseur totale de 67 mètres, équivalente pour les deux puits.

Entre des niveaux argileux, le forage B16 a traversé les Sables de Frécambault sur 26 mètres d'épaisseur (entre 522 et 548 mètres de profondeur), les Sables des Drillons sur 17 mètres d'épaisseur (entre 557 et 574 mètres) et les Sables verts de l'Albien sur une épaisseur réduite de 7 mètres (entre 582 et 589 mètres). Les résultats des essais hydrogéologiques ont montré une **épaisseur utile du réservoir évaluée à 37 mètres**, correspondant aux zones productrices constituées de sables propres et décomposée de la manière suivante :

- Sables de Frécambault : 7 mètres au sommet et 12 mètres à la base ;
- Sables des Drillons : 17 mètres ;
- Sables verts : 1 mètre.

Pour le forage B20, le forage dévié a traversé les formations sableuses perméables sur des longueurs supérieures : 33 mètres pour les Sables de Frécambault, 22 mètres pour les Sables des Drillons et 9 mètres pour les Sables verts.

Le réservoir a été développé par injection d'hexamétophosphate. Une injection d'eau oxygénée a été ajoutée pour le puits B20. Des pompages de développement ont ensuite été réalisés par paliers de débits croissants jusqu'à 160 m³/h. Un pompage « longue durée » de 72 heures a été effectué en fin d'opération à ce même débit pour chacun des deux puits. L'influence du pompage a été suivie au puits B16 pendant les essais du puits B20 (test d'interférence), confirmant la continuité du réservoir avec un rabattement proche de 2 mètres mesuré en fin de pompage.

A l'issue des essais, la **transmissivité du réservoir a été évaluée à $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (soit 530 D.m) au niveau du puits B16 et à $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (soit 300 D.m) au niveau du puits B20**. Ces valeurs témoignent des **très bonnes caractéristiques hydrogéologiques du réservoir de l'Albien, nettement supérieures à celles observées pour le Trias** (de l'ordre de 10 à 15 D.m à Melleray et Achères).

Ces caractéristiques se traduisent par des **indices de productivité des ouvrages de $65 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$ pour B16 et $37 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$ pour B20**.

Au forage B16, une température de 27°C et une pression de 2 bars ont été relevées en têtes de puits et la salinité du fluide a été évaluée à 0,26 g/l.

Le doublet d'Issy-les-Moulineaux (2011 / 2012)

Les opérations du **premier forage producteur du doublet d'Issy-les-Moulineaux ILM-1** ont été réalisées entre le 06/06/2011 (début d'installation du chantier et forage de l'avant-puits) et le 22/12/2011 (fin des essais de production de longue durée).

Les travaux de forage proprement dits ont débuté le 19/07/2011 et ont été achevés le 02/11/2011 par l'aménagement de la chambre de pompage (coupe du tubage 13''3/8), soit sur une **durée totale de 107 jours**. **L'opération a été confrontée à de nombreuses pertes de fluide (partielles et totales) et une autorisation de travaux a été obtenue pour fonctionner de manière continue (24h / 24h) entre le 26/09/2011 et le 06/10/2011**. La date du début d'autorisation coïncide avec **l'arrivée d'un ingénieur boue sur site, soit 70 jours après le début du forage**.

Ce forage vertical a été arrêté à la profondeur de 645 mètres après avoir traversé les formations argileuses de l'Aptien sur une épaisseur de 5 mètres. **Le réservoir de l'Albien a été rencontré entre 543 et 640 mètres, soit sur une épaisseur de 97 mètres** supérieure aux prévisions indiquant 86 mètres.

Une première phase de développement par air-lift et d'inspection par caméra vidéo a été réalisée sur 7 jours avec la machine de forage en place (SOILMEC G75) du 03 au 09/11/2011 avant d'être démontée le 16/11/2011, puis remplacée par une autre machine (AQUADRILL 1600) pour poursuivre la phase d'essais du 21/11/2011 au 22/12/2011.

Implanté à une distance de 380 mètres au nord-est du premier puits, le **forage injecteur ILM-2 a été réalisé en déviation** orientée dans la même direction (azimut 51,70°), **avec un angle d'inclinaison au toit du réservoir proche de 27°**. Avec un départ en déviation à la profondeur de 160 mètres environ, le déplacement horizontal obtenu (119,5 mètres) a permis d'écarter les points d'impact au réservoir d'une distance proche de 500 mètres.

Pour cet ouvrage, les opérations ont été enregistrées entre le 17/11/2011 (forage de l'avant-puits et installation du chantier) **et le 20/12/2012** (fin du quatrième test d'injection). Les travaux de forage proprement dits ont été réalisés entre le 10/01/2012 et le 25/04/2012 (mise en place des crépines), **soit sur une durée globale de 107 jours équivalente à la durée des travaux du premier puits**. Ces travaux ont été menés de manière discontinue (interruption la nuit et le week-end) et ils ont dû être interrompus en raison d'une panne de pompe (15 jours) et d'intempéries (gel, 10 jours).

Ce forage a été arrêté à la profondeur de 701 mètres (profondeur verticale de 665 mètres) après avoir traversé 29 mètres dans l'Aptien. **Le réservoir de l'Albien a été rencontré entre 563 et 672 mètres forés** (540 à 639 mètres de profondeur verticale), **soit sur une longueur de 109 mètres correspondant à une épaisseur de 99 mètres équivalente à celle du premier puits.**

Une première phase de développement (par soufflage principalement puis par air-lift) a été réalisée sur 10 jours (du 02 au 23/05/2012) avec la machine de forage en place jusqu'au 29/05/2012. Les essais de production par pompage et un test d'interférence avec ILM-1 ont ensuite été menés sur une semaine (du 31/05 au 06/06/2012) et les opérations sur le puits ILM-2 ont été finalisées par quatre essais d'injection :

- un premier essai mené du 07 au 21/06/2012 ;
- un deuxième essai du 11 au 17/07/2012 ;
- un troisième essai le 23/07/2012 ;
- un quatrième essai le 20/12/2012 après le nettoyage par soufflage du puits ILM-2 (les 29 et 30/08/2012) et **l'apport d'un complément de graviers dans l'annulaire de la colonne captante du forage ILM-1 (septembre 2012).**

Au niveau du réservoir, **le forage du puits ILM-1 a été réalisé en diamètre 12''1/4 puis alésé en 15'', alors que pour le puits ILM-2 le réservoir foré en diamètre 12''1/4 n'a pas été alésé.** Des crépines de nature et de diamètre différents ont ensuite été mises en place (voir plus bas).

Les niveaux perméables correspondant, de haut en bas, aux **Sables de Frécambault**, aux **Sables de Drillons** et aux **Sables verts** ont été traversés sur des épaisseurs respectives de **33,5, 19,3 et 33 mètres pour le puits vertical ILM-1** et sur des longueurs respectives de **35, 16 et 50 mètres pour le puits dévié ILM-2**. Pour une épaisseur équivalente de l'Albien constatée entre les deux puits (97 et 99 mètres), **les longueurs forées dans les niveaux perméables sont supérieures de 15% au puits dévié ILM-2.**

Des analyses granulométriques ont été réalisées sur les trois niveaux sableux du réservoir. Les courbes granulométriques présentent des allures relativement semblables, avec une **composition majoritaire de sables fins à moyens avec une dimension généralement inférieure à 2 mm.** Les Sables verts présentent un faciès plus grossier que les deux autres niveaux sableux.

Entre ces niveaux perméables, les argiles Tégulines et les Argiles de l'Armance ont des épaisseurs réduites : respectivement 3,7 et 7,5 mètres pour le puits ILM-1, 2 et 6 mètres pour le puits ILM-2.

Les niveaux producteurs ont été identifiés lors des diagraphies de production (micromoulinet, température et conductivité) réalisées le 05/01/2012 pour le puits ILM-1 et le 06/07/2012 pour le puits ILM-2. **Une valeur maximale de 30,8°C a été relevée en fond de chacun des deux puits.**

Au débit moyen de pompage de 73 m³/h (équivalent pour les deux essais), **l'ensemble de la hauteur du réservoir semble produire** avec une contribution au débit variable selon les niveaux.

Pour le puits ILM-1, dont certaines sections du réservoir (en particulier les niveaux correspondant aux Argiles Tégulines et aux Argiles de l'Armance) sont masquées par des tubes

pleins empêchant toute arrivée d'eau dans le puits à ces niveaux, **la production proviendrait majoritairement des Sables de Frécambault avec une contribution au débit total de l'ordre de 66,5%**, puis des Sables des Drillons pour 29% (avec notamment un niveau peu épais de 0,5 mètre contribuant pour près de 15% au débit total) et des Sables verts pour seulement 4,5% environ.

Au puit ILM-2, dont seule une section basse au sein des Sables verts est masquée par un tube plein, **la contribution des Sables de Frécambault resterait majoritaire (de l'ordre de 49%)** mais le rapport s'inverserait entre les Sables des Drillons (18%) et les Sables verts (33%) dont un niveau de 7 mètres situé au toit contribuerait pour près de 25% au débit total.

A la réserve que les sections en tube plein puissent masquées des arrivées d'eau au sein du puits ILM-1, la hauteur utile du réservoir (somme des hauteurs des niveaux producteurs) serait nettement plus importante au puits injecteur ILM-2 (95,1 mètres) qu'au puits producteur ILM-1 (50,2 mètres).

Les essais du puits ILM-1 ont mis en évidence une arrivée d'eau anormale (venue d'eau importante par l'espace annulaire, estimée à 11% du débit total de production et chargée en matières en suspension) **au sommet de la colonne captante**, correspondant au *liner hanger* mis en place à 525,3 mètres de profondeur (Cf. coupe technique de la Figure 12).

Suite à la diminution de l'injectivité du puits ILM-2 constatée lors des essais d'injection postérieurs et probablement liée à la production de particules fines issues du puits ILM-1, des investigations complémentaires réalisées en septembre 2012 ont confirmé l'origine des désordres. La photographie de la Figure 12, issue d'une nouvelle inspection vidéo et extraite du rapport de fin de travaux, illustre le problème observé.

Suivant la coupe technique de la Figure 12, **la hauteur de la colonne captante au-dessus du toit du réservoir est de 15,7 mètres, avec une hauteur de graviers (massif filtrant) de 11 mètres qui a dû être complétée en septembre 2012, à la suite des investigations complémentaires, par un ajout de graviers (calibre 1 – 1,25 mm) au sommet de la colonne pour empêcher le flux de passer par l'annulaire.**

Pour ce qui concerne la complétion des deux puits, compte tenu des diamètres de foration différents au niveau du réservoir, les puits producteur ILM-1 (foré en 12"1/4 puis alésé 15") et injecteur ILM-2 (foré en 12"1/4, sans alésage) sont respectivement équipés des éléments suivants :

- une crépine inox 304 L de diamètre 8"5/8, de type JOHNSON constituée par un **fil continu enroulé sur un tube comportant des perforations de 16 mm. Un massif filtrant composé de graviers (calibre 1 - 1,25 mm) a ensuite été mis en place dans l'espace annulaire.**
- une crépine inox 304 L de type JOHNSON MUNI-PAK constituée par une **double paroi 8"5/8 (de type fil enroulé) et 10"5/8 (à nervures repoussées), l'espace interne pré-gravillonné (calibre 1,16 à 1,7 mm) assurant la fonction d'un massif filtrant.**

L'ouverture des crépines (slot) est de 0,8 mm pour les deux puits.

La Figure 13 permet de visualiser la nature différente des crépines mises en place dans chacun des forages au niveau du réservoir. Ces photographies sont extraites de l'inspection vidéo présentée dans les DOE des travaux de forage.

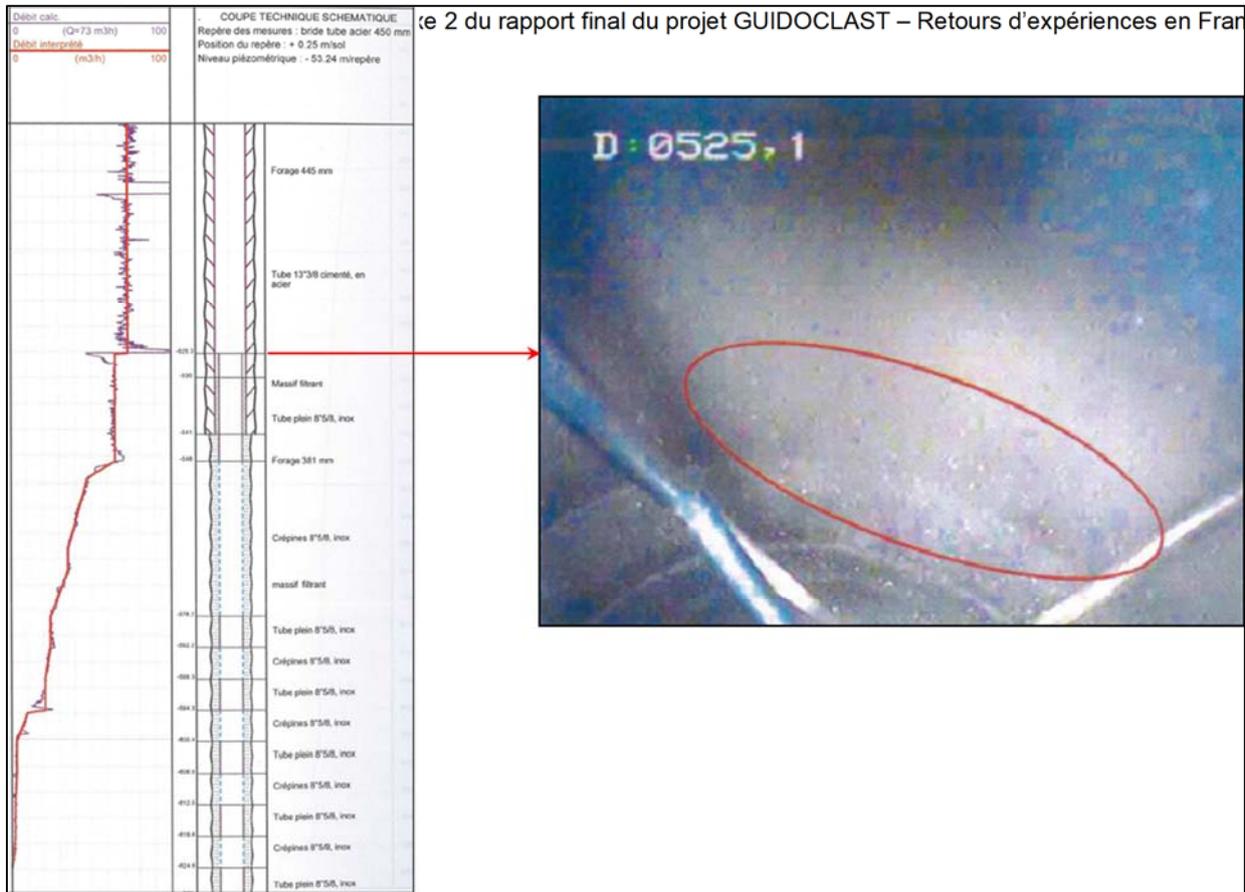


Figure 12 : Mise en évidence d'une venue d'eau anormale chargée en MES par l'espace annulaire du puits de production ILM-1 d'Issy-les-Moulineaux.

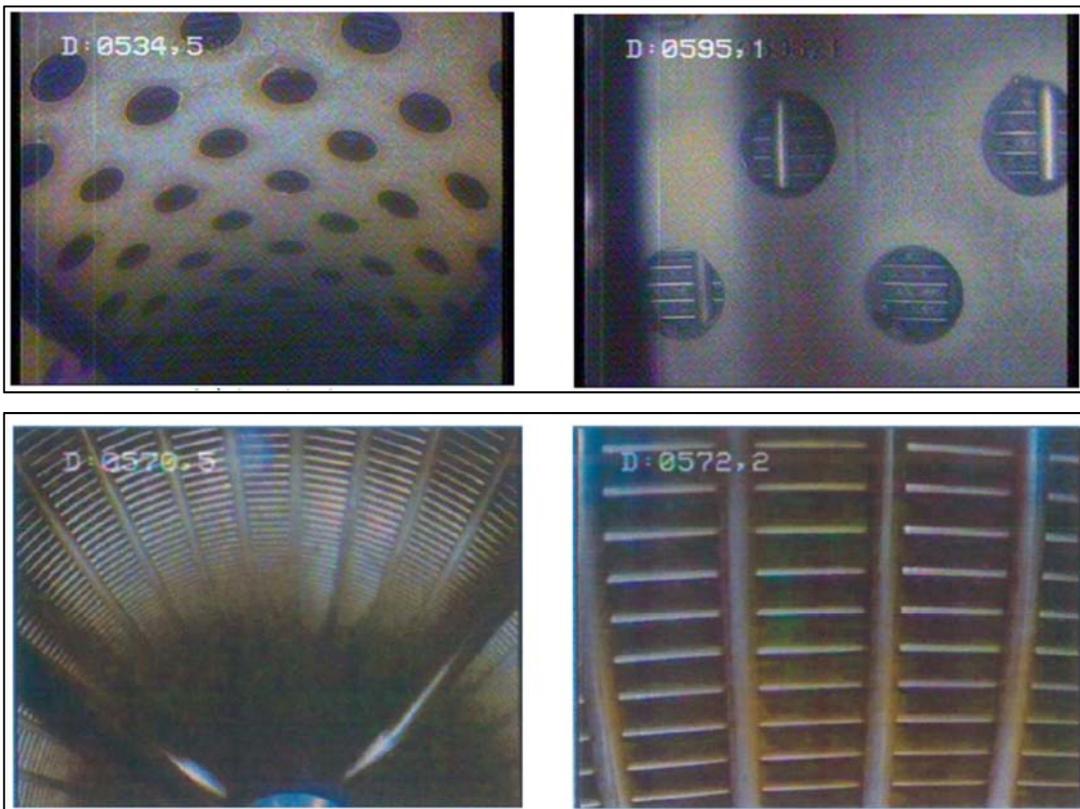


Figure 13 : Photographies des crépines des forages producteur ILM-1 (en haut) et injecteur ILM-2 (en bas) du doublet d'Issy-les-Moulineaux.

Par rapport au premier puits, **le forage du réservoir et la nature de l'équipement du puits ILM-2 présentent plusieurs avantages :**

- il permet d'éviter l'alésage du réservoir réduisant ainsi la durée et les risques associés à ce type d'opération ;
RQ : Pour le puits ILM-2, la phase de forage correspondant à la traversée de la Craie du Sénonien jusqu'au toit du réservoir de l'Albien a été réalisée en déviation à partir d'environ 160 mètres, en diamètre 12''1/4 puis alésée en diamètre 17''1/2. Une première tentative d'alésage a conduit à la sortie de la trajectoire initiale à partir d'environ 350 mètres. Après la mise en place d'un bouchon de ciment, le forage en 12''1/4 a été repris, puis alésé en 17''1/2 en suivant correctement la trajectoire prévisionnelle de l'ouvrage.
- il facilite la mise en place du massif filtrant intégré à la crépine (= espace interne pré-gravillonné) *a fortiori* dans un puits dévié ;
- il offre une plus grande surface à l'écoulement du fluide au contact entre le réservoir et la crépine, réduisant de fait les vitesses d'écoulement.

Ce choix a peut-être été lié à des difficultés de réalisation du premier puits (alésage, mise en place du massif filtrant) ou simplement à une impossibilité d'anticiper le dimensionnement des crépines et le calibrage du massif filtrant, sans connaître au préalable la granulométrie des sables de l'Albien, et en tenant compte du délai d'approvisionnement sur chantier des équipements adéquats.

A la suite des opérations de développement des forages, les essais de pompage ont été réalisés du 15 au 22/12/2011 pour le puits ILM-1 et du 31/05 au 06/06/2012 pour le puits ILM-2.

Ils ont débuté par des essais par paliers visant à caractériser la productivité des ouvrages. **Six paliers d'une heure ont été réalisés pour chaque ouvrage avec des débits croissants, variant de 90 à plus de 250 m³/h** (274 m³/h pour le puits ILM-1, débit maximal pour la pompe en place). **Les paliers ont été enchainés en respectant une phase de remontée de 1h30 entre chaque palier.** Les ouvrages ont montré une **excellente productivité avec des indices de 117 m³/h/bar pour le puits ILM-1 (producteur) et 94 m³/h/bar pour le puits ILM-2 (injecteur).** Les débits critiques des ouvrages n'ont pas été atteints (pas d'apparition de pertes de charges quadratiques significatives au débit de production maximal).

Ces essais ont été finalisés par des **tests de pompage de longue durée : 72 heures pour le puits ILM-1 au débit moyen de 216 m³/h et près de 52 heures pour le puits ILM-2 au débit moyen proche de 224,5 m³/h.** L'interprétation de ces tests a permis de déterminer une **transmissivité du réservoir proche de 6.10⁻³ m²/s équivalente pour les deux forages,** et tout à fait cohérente avec les valeurs connues pour l'Albien.

Au cours des essais de production du forage ILM-2, le suivi piézométrique du puits ILM-1 a montré une connexion hydraulique du réservoir (**test d'interférence**), avec une influence observée après 40 minutes de pompage et un rabattement final mesuré à une valeur proche de 4 mètres. Le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère a été évalué à 1,4.10⁻⁴.

Les suivis physico-chimiques effectués au cours des phases de production ont montré une **eau de type bicarbonaté calcique et magnésienne,** avec un fluide **faiblement minéralisé** (de l'ordre de 280 µS/cm), **dépourvu en oxygène dissous,** et un pH compris entre 7,65 et 7,85.

Sur le plan bactériologique, les analyses ont montré l'absence d'*Entérocoques* et d'*Escherichia Coli*.

Les dernières opérations menées dans le cadre de la réalisation du doublet d'Issy-les-Moulineaux se sont concentrées sur les **tests de réinjection du puits ILM-2 qui ont été menées sur une longue période (de juin à décembre 2012)**, compte tenu d'un certain nombre de **difficultés techniques liées principalement aux conditions de chantier** et des **résultats montrant rapidement une perte d'injectivité de l'ouvrage**. Deux opérations de nettoyage complémentaires, réalisées en août 2012 et mars 2013, ont été nécessaires suite aux tests de réinjection.

La phase correspondant au **premier test de réinjection** (du 07 au 21/06/2012) a été réalisée immédiatement après les phases de forage, de développement et d'essais de production du puits ILM-2. Le fluide pompé dans le puits ILM-1 au débit maximal (250 m³/h) a d'abord été rejeté à l'égout avant d'obtenir une eau claire, dépourvue de sables, pouvant être réinjectée dans le puits ILM-1. Ce test a été constitué successivement par :

- un **test par paliers** (5) de débits croissants (variant entre des valeurs proches de 95 à **202 m³/h** maintenues sur des durées de 2 à 3 heures) suivant une séquence comprenant 2 paliers successifs suivis d'une remontée, puis 3 nouveaux paliers successifs. A la fin du dernier palier, la pression en tête de puits a été mesurée à 1,8 bar (« données manuelles » fournies par l'entreprise de forage) et l'indice d'injectivité a été évalué à **30 m³/h/bar** (niveau statique de la nappe mesuré à environ 50 mètres de profondeur).
- un **test de longue durée (71h35)** au débit moyen proche de 164 m³/h. En fin de test, la pression en tête de puits était de 5,24 bars pour un débit proche de **141 m³/h** et l'indice d'injectivité a été évalué à une valeur proche de **14 m³/h/bar** nettement inférieur au résultat précédent obtenu avec un débit supérieur. Ce test a été interrompu suite à une fuite constatée sur une canalisation à proximité du forage ILM-1, probablement liée au passage de poids lourds.

Le **deuxième test d'injection** (du 11 au 17/07/2012) constitué des mêmes séquences a montré les résultats finaux suivants :

- **test par paliers** (aux débits de 90 à **160 m³/h** au maximum) : pression de l'ordre de 4 bars en tête et indice d'injectivité de **18 m³/h/bar** ;
- **test de longue durée (26h10 – débit moyen 139 m³/h)** : pression de 5,5 bars en tête et indice d'injectivité de l'ordre de **13 m³/h/bar**. Ce test a été interrompu suite à la rupture du flexible en sortie du forage ILM-1 provoquée par le creusement d'une tranchée.

Le **troisième test d'injection** (le 23/07/2012) consistait à refaire le test de longue durée. Ce test a dû être interrompu **après 1h37** suite à la rupture d'un flexible situé en amont du forage ILM-2. Les résultats montraient toujours une baisse de l'injectivité de l'ouvrage : pression en tête proche de 6 bars et indice d'injectivité évalué à **11,5 m³/h/bar** pour un débit de **123 m³/h**.

Suite à ce constat, une pompe d'exhaure a été descendue dans le puits pour vérifier la productivité de l'ouvrage qui s'est avérée moins bonne qu'à l'origine, avec une eau chargée en particules fines. **Un premier nettoyage du forage par soufflage** a donc été réalisé (29 et 30/08/2012) jusqu'à l'obtention d'une eau claire dépourvue de fines.

Après les investigations complémentaires et l'ajout de graviers dans la colonne captante du forage ILM-1 (visant à empêcher la production de particules fines au niveau du puits producteur), un **quatrième test d'injection** a été réalisé le 20/12/2012. Suite à une première phase de production avec rejet à l'égout du fluide extrait du puits ILM-1, ce dernier essai n'était constitué que d'un test par paliers (4 paliers de 3 heures) à des débits successifs et croissant de 92 à **162 m³/h**. L'indice final d'injectivité a été évalué à **42 m³/h/bar**.

Pour ce dernier test, le rapport de fin de travaux indique le passage du fluide dans un hydrocyclone et deux filtres à sables qui ne sont pas mentionnés pour les tests précédents. Ces équipements ont dû être nettoyés en cours de test afin de pouvoir maintenir le débit maximal.

Les conclusions du rapport soulignent également les **difficultés rencontrées au cours des tests** qui n'ont finalement pas permis de déterminer précisément les capacités d'injection du dispositif. Aussi, le **dimensionnement de la pompe de production a été réalisé en conséquence** (marge de sécurité par rapport à la HMT de la pompe et la pression en tête du forage ILM-2 permettant une injection sous pression) et le **dispositif de filtration (hydrocyclone et deux filtres à tamis) a été mis en place en amont des échangeurs**.

Le retour d'expérience du Maître d'ouvrage Délégué (DALKIA) et du Maître d'œuvre (G2H Conseils) relatif à la réalisation des forages géothermiques à l'Albien d'Issy-les-Moulineaux a été présenté au cours du Comité Technique de la Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP) du 31/05/2016. Il ressort de cette présentation des pistes d'amélioration portant sur les points suivants :

- un **fonctionnement du chantier en continu** (24h / 24h). Le fonctionnement discontinu étant à l'origine de beaucoup de retards et de temps morts liés à la mise en sécurité des puits lors des interruptions (nuit et week-end) ;
- un meilleur dimensionnement des **unités de fabrication et de traitement des boues de forage** ;
- une meilleure supervision des travaux avec notamment une présence permanente du prestataire en charge du conditionnement des boues de forage ;
- **une durée suffisante pour la réalisation des essais en fort débit**.

Le doublet du Plessis-Robinson (2012)

Réalisés en 2012, les forages du doublet géothermique du Plessis-Robinson ont ciblé le **réservoir du Néocomien**.

Les opérations ont débuté par la réalisation du **puits producteur LPR-1 vertical**. Enregistrées entre le 07/12/2011 (préparation de la plateforme et réalisation de l'avant-puits) et le 07/09/2012 (fin des tests de réinjection de LPR-1 vers LPR-2), les travaux de forage proprement dits ont été réalisés sur une **durée de 53 jours en travail discontinu** (interruption la nuit et le week-end) entre le 23/01/2012 et le 15/03/2012 (mise en place de la crépine et du massif filtrant). Les travaux ont été retardés en raison de mauvaises conditions climatiques (gel).

Après une première phase de développement et de traitement (hexamétaphosphate) du puits LPR-1 (du 16/03/2012 au 30/03/2012), l'appareil de forage a été déplacé pour la réalisation du second forage.

Implanté à environ 580 mètres du premier puits, les opérations relatives au puits LPR-2 ont été enregistrées entre le 13/02/2012 (plateforme et avant-puits) et le 07/09/2012 (tests de réinjection). Les travaux de forage de ce puits dévié ont été réalisés sur une **durée de 46 jours**, du 18/04/2012 au 02/06/2012 (cimentation complémentaire du tubage 10''3/4). La déviation amorcée à la profondeur de 263 mètres a été orientée vers le nord avec une **inclinaison de 30,5° au toit du réservoir** permettant d'obtenir un **déplacement horizontal (déport) proche de 260 mètres**.

Les forages LPR-1 et LPR-2 ont été arrêtés à des **profondeurs respectives de 995 mètres** (cote verticale) **et de 1040 mètres** (cote forée), après avoir atteint le toit du réservoir à des profondeurs conformes aux prévisions : 874 mètres pour LPR-1 et 889 mètres pour LPR-2. Mise à part la déviation du second puits, l'architecture des forages est relativement similaire (Cf. coupes techniques Figure 14 et Figure 15).

Pour le puits producteur LPR-1, la coupe du tubage 10''3/4 à la **profondeur de 332 mètres** a permis d'aménager une **chambre de pompage constituée par le tubage 16''** dont le sabot a été mis en place à 374,5 mètres. Une cimentation complémentaire du tubage 10''3/4 a dû être réalisée après la coupe du tube.

Le tubage 10''3/4 du puits injecteur LPR-2 a également été coupé à une profondeur inférieure (182 mètres) afin de reprendre la cimentation déficiente de la partie sommitale de ce tubage.

Au niveau du réservoir, le forage du puits LPR-1 a été effectué en diamètre 9''1/2 puis alésé en 15'', tandis que le réservoir du puits LPR-2 foré également en 9''1/2 a été alésé au diamètre 11''. Comme pour le doublet d'Issy-les-Moulineaux, les puits du Plessis-Robinson ont été équipés d'une complétion de nature et de diamètres différents :

- pour la complétion du puits producteur LPR-1, une crépine inox 304 L de diamètre 7''5/8, de type JOHNSON constituée par un **fil continu enroulé sur un tube comportant des perforations de 16 mm. Un massif filtrant composé de graviers siliceux (calibre 0,8 - 1,4 mm) a ensuite été mis en place dans l'espace annulaire**. L'ouverture des crépines (slot) est de 0,75 mm. Par rapport à l'épaisseur du réservoir (121 mètres), les longueurs crépinées représentent un ratio de 59,6% ;
- pour la complétion du puits injecteur LPR-2, une crépine inox 304 L de type JOHNSON MUNI-PAK **constituée par une double paroi 6''5/8 (de type fil enroulé) et 8''5/8 (à nervures repoussées), l'espace interne rempli par des billes de verre (calibre 1,25 à 1,65 mm) assurant la fonction d'un massif filtrant**. L'ouverture des crépines (slot) est de 1 mm. Par rapport à la hauteur traversée dans le réservoir (132 mètres), les longueurs crépinées représentent un ratio de 65,2%.

NB : Lors de la mise en place des crépines, l'ancreur (« hanger ») surmontant la colonne captante n'a pu être verrouillé. Après la mise en eau du forage, un massif de gravier complémentaire (calibre 2,5 – 5 mm) et un second obturateur (« packer seal ») ont été mis en place.

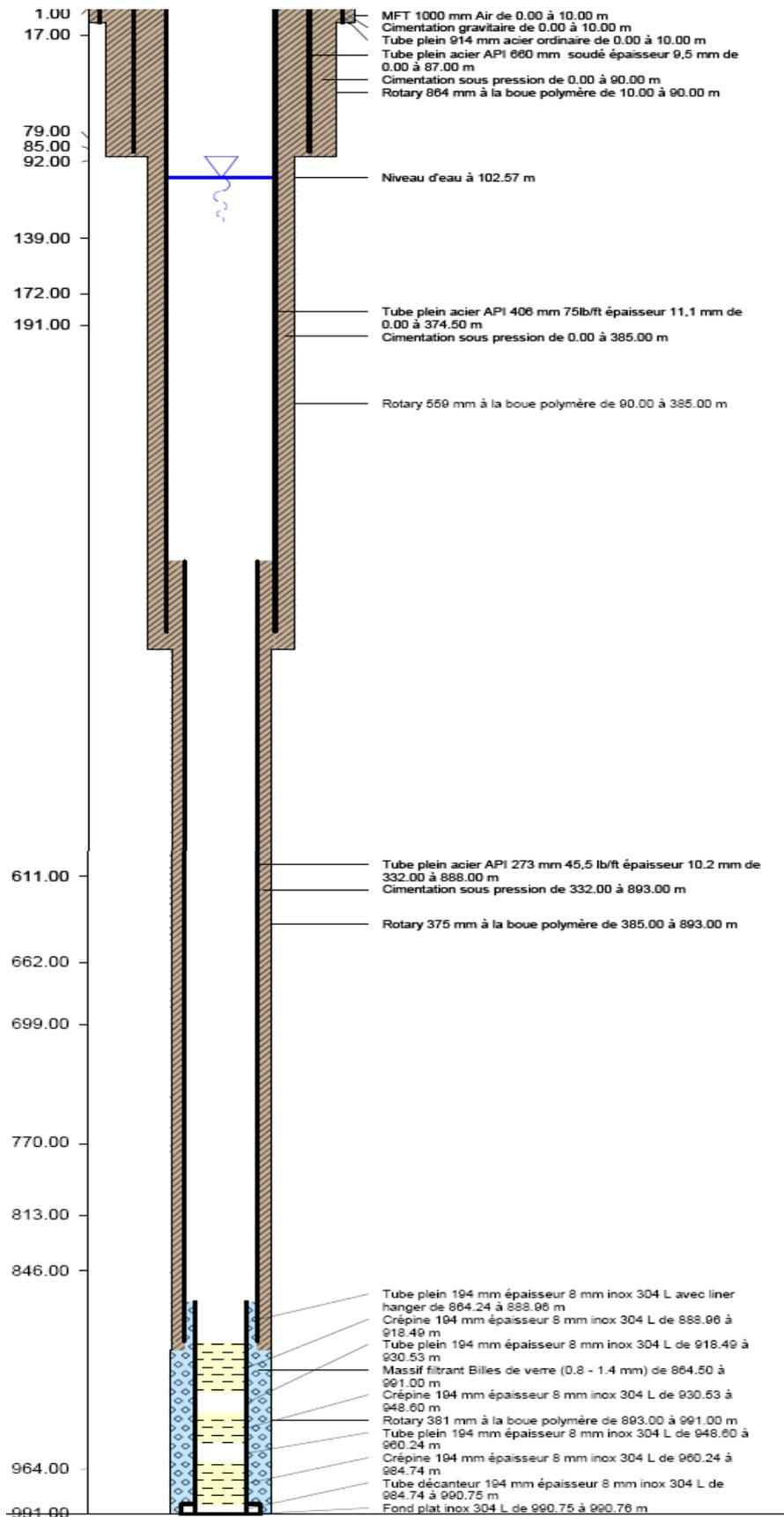


Figure 14 : Coupe technique du puits producteur LPR-1 du Plessis-Robinson.

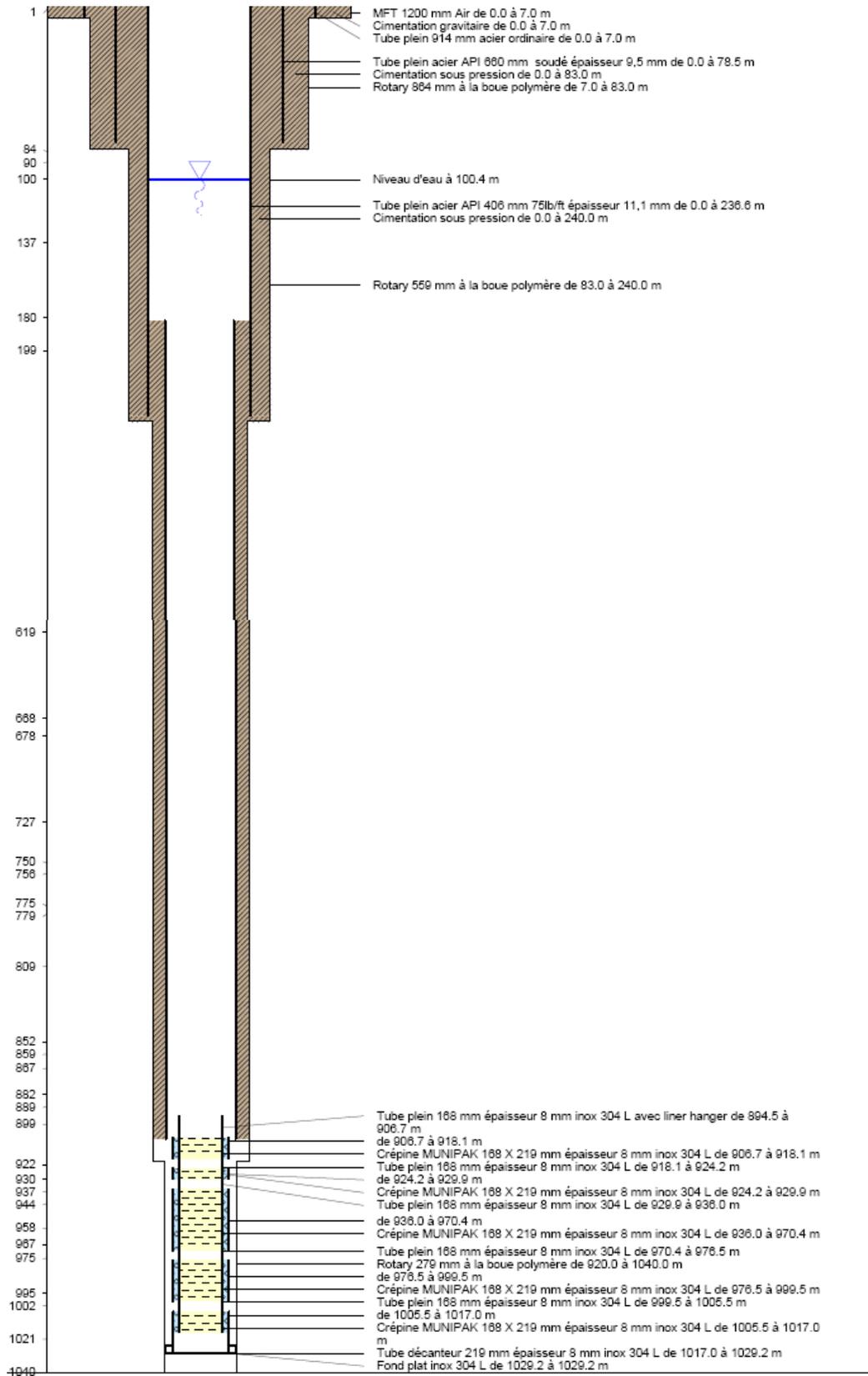


Figure 15 : Coupe technique du puits injecteur LPR-2 du Plessis-Robinson.

Dans le cas de ces deux puits, **la colonne captante est équipée de centreurs et de joints de raccordement diélectriques permettant d'éviter les problèmes de corrosion galvanique** entre l'acier au carbone des tubages et des éléments d'ancrage de la compléation et l'inox des crépines.

D'un point de vue lithologique, le réservoir du Néocomien est constitué par des alternances de niveaux sableux et d'argiles. Des analyses granulométriques réalisées à partir d'échantillons de terrain (« cuttings ») indiquent une **composition majoritaire de sables fins à moyens, localement grossiers**. La fraction la plus fine (inférieure à 0,08 mm) varie très fortement (de 8% à 75 % pour les échantillons analysés au puits LPR-2) d'un échantillon à l'autre, sachant que leur représentativité peut fortement être remise en cause (remontée différentielle des cuttings dans l'annulaire en cours de forage et prélèvement des échantillons possible qu'après les désilteurs).

Au sein du réservoir traversé par le forage producteur LPR-1, l'interprétation croisée des diagraphies de réservoir (Radioactivité Naturelle, Polarisation Spontanée et Résistivité) a permis de distinguer cinq grands ensembles à dominante sableuse ou argileuse, puis de positionner les crépines en conséquence. Un niveau sableux intermédiaire, repéré entre 929 et 950 mètres de profondeur, s'est avéré être une **zone productrice importante contribuant à près de 88% du débit d'essai (limité à 47,5 m³/h) sur une épaisseur réduite d'environ 13 mètres (entre 934 et 947 mètres)**. Trois autres niveaux producteurs ont été repérés par flowmétrie, au-dessus (5% du débit entre 902 et 910 mètres et 3% du débit entre 915 et 918 mètres) et en dessous (4 % du débit entre 960 et 965 mètres) de la zone contributrice principale. Au total, **l'épaisseur utile du réservoir représente une hauteur réduite de 27,2 mètres sur une épaisseur totale de 121 mètres**.

Pour le réservoir du forage injecteur LPR-2, l'interprétation croisée des diagraphies de réservoir n'a pas permis de discerner véritablement de grands ensembles de sables ou d'argiles, à l'exception d'une section réduite à 3 mètres (entre 933 et 936 mètres) à dominante argileuse. Les niveaux producteurs semblent davantage répartis sur la hauteur du réservoir :

- 14% du débit entre 906,5 et 909 mètres ;
- 4% entre 924 et 927 mètres ;
- 10% entre 936 et 984,5 mètres ;
- 18% entre 984,5 et 986 mètres ;
- 25% entre 988 et 990 mètres ;
- 12% entre 990 et 993,5 mètres ;
- 10% entre 993,5 et 994,5 mètres ;
- 7% entre 1006 et 1016 mètres.

La section intermédiaire du réservoir comprise entre 984,5 et 994,5 mètres contribue néanmoins majoritairement au débit (65 %) sur une épaisseur réduite (10 mètres) sensiblement équivalente à la zone contributrice majeure observée sur LPR-1 (13 mètres).

L'épaisseur utile du réservoir évaluée à 71,6 mètres pour le puits dévié LPR-2, apparaît nettement supérieure à celle déterminée au puits LPR-1 (27,2 mètres), pour une hauteur totale du Néocomien de 132 mètres légèrement supérieure (121 mètres). L'épaisseur importante (48,5 mètres) du niveau producteur identifié entre 936 et 984,5 mètres (10% du débit) explique cette différence apparente. L'apparition de ce niveau pourrait simplement être liée au débit de production supérieur appliqué lors de la flowmétrie effectuée au puits LPR-2 (72 m³/h au lieu de 47,5 m³/h).

Suite aux travaux de forage, les opérations de développement et d'essais ont été réalisées alternativement sur les deux ouvrages.

Pour le puits LPR-1, la succession des opérations a été la suivante :

- **première phase de développement et de traitement** (hexamétaphosphate) par air-lift et pistonnage du 16 au 22/03/2012 ;
- après la coupe du tubage 10''3/4, **pompage de développement** du 27 au 30/03/2012 ;
- **premiers essais de production** du 10 au 12/04/2012 (interruption de l'essai de longue durée en raison d'une panne de la pompe immergée) ;
- cimentation complémentaire du tubage 10''3/4 du 03 au 05/05/2012 ;
- **seconde phase de développement à l'air-lift et de traitement** (hexamétaphosphate) du 09 au 31/05/2012 avec opérations de contrôle de l'ouvrage (inspections vidéo, cimentation complémentaire) et diagraphies de production (flowmétrie) ;
- **troisième phase de développement par air-lift** du 14 au 22/08/2012 ;
- mise en place d'une pompe immergée, de la conduite de refoulement et d'un **hydrocyclone** (Figure 16 – source DOE) du 23 au 27/08/2012 ;
- **essais de production et tests de réinjection** du 28/08/2012 au 07/09/2012.



Figure 16 : Photographie de l'hydrocyclone mis en place pour les essais du puits producteur LPR-1.

Après la fin des travaux de forage du puits LPR-2 (02/06/2012), la succession des opérations a été la suivante :

- **première phase de développement à l'air-lift** du 03 au 12/06/2012 et contrôles de l'ouvrage (cimentation complémentaire et inspection vidéo) ;
- repli de la machine de forage HH-102 et installation de l'atelier de forage SK-11 du 13 au 20/06/2012 ;
- mise en place d'un cône sur la coupe du tubage 10''3/4 du 21 au 25/06/2012 ;
- **seconde phase de développement à l'air-lift, soufflage et traitement** (hexamétaphosphate) du 26/06/2012 au 24/07/2012 ;
- **essais de pompage** avec diagraphies de production (flowmétrie) et inspection vidéo du 25/07/2012 au 09/08/2012 ;
- **équipement du puits** (tête de puits définitive, colonne d'injection et de mesure de niveau) du 10 au 31/08/2012 ;
- **tests d'injection** du 04 au 07/09/2012.

Les essais de pompage ont permis de déterminer les caractéristiques des ouvrages et du réservoir.

Les résultats des essais de production par paliers (4 paliers de 2 heures à des débits variant de 80 à **200 m³/h**, entrecoupés par une remontée de pression de même durée) ont donné des **indices de productivité similaires pour les deux ouvrages : 35 m³/h/bar pour LPR-1** (2^{ème} essai) et **33 m³/h/bar pour LPR-2**. Les courbes caractéristiques des ouvrages montrent des pertes de charge quadratiques représentant 33 à 34% du rabattement mesuré au débit maximal qui sont jugées acceptables, le débit d'exploitation prévisionnel de 200 m³/h étant visiblement inférieur au débit critique des ouvrages.

L'interprétation des **essais de longue durée (72 heures au débit moyen proche de 185 m³/h)** donne une **transmissivité du réservoir de l'ordre de 3.10⁻³ m²/s** et un **coefficient d'emménagement proche de 7,5.10⁻⁵**, sensiblement équivalentes pour les deux ouvrages et conformes aux caractéristiques connues de l'aquifère. Les tests d'interférence entre puits ont montré une influence très rapide du pompage donnant un rabattement de l'ordre de 6 mètres après 72 heures de production.

Des **températures de 38,6°C pour le puits LPR-1 et 37,5°C pour le puits LPR-2** ont été mesurées au cours des pompages par l'intermédiaire d'un capteur immergé (profondeur non précisée).

Les suivis physico-chimiques effectués au cours des phases de production ont montré une **eau de type bicarbonaté calcique et magnésienne**, avec un fluide **faiblement minéralisé** (de l'ordre de 450 µS/cm), **dépourvu en oxygène dissous mais contenant du fer dissous** (210µg/l pour LPR-1 et 130 µg/l pour LPR-2) **et des traces de manganèse** (26 à 27 µg/l), et un pH de l'ordre de 7,6. Sur le plan bactériologique, les analyses ont montré l'absence de germes pathogènes (*Entérocoques* et d'*Escherichia Coli*) et la **présence de bactéries sulfato-réductrices** dont l'origine serait probablement liée aux travaux.

Le test de réinjection final (au débit de 182 m³/h pendant 65h30) a révélé un **indice d'injectivité élevé du puits LPR-2 évalué à 41 m³/h/bar**, supérieur à l'indice de productivité mais influencé par le pompage concomitant au puits LPR-1.

Le doublet de la ZAC Clichy-Batignolles à Paris (2014)

L'opération géothermique de la ZAC Clichy-Batignolles est la l'avant-dernière réalisation en date ciblant le **réservoir de l'Albien (2 nouveaux doublets à l'Albien forés en 2017)**. Le doublet réalisé en 2014 comporte **deux puits déviés** implantés dans le 17^{ème} arrondissement de Paris sur des sites distincts éloignés d'environ 400 mètres.

La photographie de la Figure 17, extraite du rapport de fin de travaux (DOE), montre une partie de l'emprise du chantier ainsi que la disposition de la machine de forage (HH-102B) et de ses principaux équipements (pompes, bassins et centrifugeuse notamment) sur le deuxième site en juillet 2014.

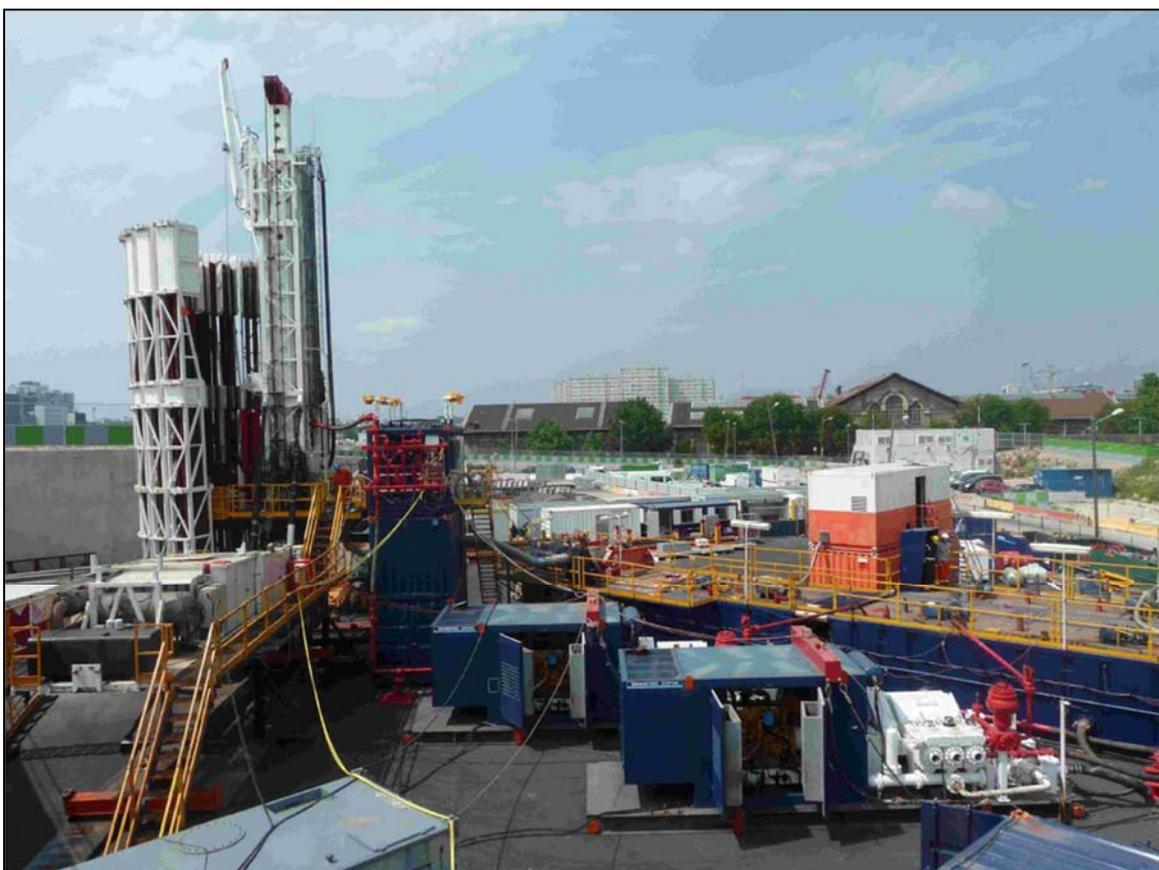


Figure 17 : Photographie du chantier de forage de Clichy-Batignolles (Paris 17^{ème}).

Le **puits producteur P1** a été orienté vers le nord-nord-ouest (azimut 344°) avec une **déviations proche de 22° au toit du réservoir** (déplacement horizontal de 120 mètres) réalisée en deux temps :

- une première déviation amorcée à 195 mètres de profondeur ;
- une seconde déviation consécutive à un premier sinistre et la réalisation d'un side-track à partir de 476 mètres.

Orienté vers le sud-sud-est (azimut 158°), la déviation du **puits injecteur P2** a été amorcée à la profondeur de 200 mètres, pour atteindre une **inclinaison du forage proche de 16° au toit du réservoir**, induisant un déplacement horizontal (déport) de 120 mètres par rapport à la tête de puits.

Les forages P1 et P2 ont été arrêtés à des profondeurs respectives de 764 et 755 mètres, atteignant le **toit du réservoir à une profondeur verticale proche de 650 mètres**. L'écartement entre les impacts au toit du réservoir des forages est évalué à 624 mètres.

L'architecture des puits est similaire :

- le forage P1 est constitué d'un tubage 16" descendu à 180 mètres de profondeur (chambre de pompage de 153 mètres de profondeur) et d'un tubage 10"3/4 jusqu'au toit du **réservoir foré ensuite en diamètre 9"7/8**.
- pour le forage P2, le tubage 16" a été descendu à 169 mètres et le tubage 10"3/4 a été coupé à 140 mètres de profondeur. **Le réservoir a été foré en diamètre 9"5/8 puis alésé en 9"7/8**.

Les opérations ont été enregistrées entre le 08/04/2014 (avant-puits et plateforme) et le 17/09/2014 (fin des essais de pompage) pour le puits P2, et entre le 17/04/2014 (avant-puits et plateforme) et le 08/12/2014 (inspection caméra et diagraphies réservoir) pour le puits P1.

Dans un premier temps, les **travaux de forage du puits injecteur P2** ont été réalisés entre le 25/07/2014 et le 20/08/2014 (fin de la phase de forage du réservoir), soit sur **une durée réduite de 27 jours**. Un défaut de cimentation du tubage 10"3/4 a conduit à la coupe du tubage et à la réalisation d'une cimentation complémentaire.

Pour la **réalisation du puits producteur P1**, les travaux de forage proprement dits ont été réalisés entre le 02/09/2014 et le 29/11/2014 (coupe du tubage 10"3/4), soit sur une **durée totale de 89 jours**. **Deux sinistres liés à une cimentation défectueuse du tubage 10"3/4** sont la cause d'un retard important évalué au total à 61 jours. **Le premier sinistre (15 jours) a conduit à la réalisation d'un side-track (puits P1-ST)** à partir de 476 mètres de profondeur. Le second sinistre (46 jours) a nécessité la coupe du tubage 10"3/4 à 75 mètres de profondeur, le surforage en diamètre 13"3/8 de l'espace annulaire entre les tubages 16" et 10"3/4 de 75 à 110 mètres environ, puis le fraisage du tubage 10"3/4 jusqu'à la profondeur de 153 mètres.

Ces travaux ont été réalisés de manière discontinue, avec une journée par semaine sans activité correspondant au jour de repos hebdomadaire principalement mis en place les dimanches.

La complétion des puits est également similaire, comportant une **crépine en inox 304 L de type « MUNI-PAK JOHNSON avec technologie skeleton » composée d'une double paroi interne en 6"5/8 et externe en 8"5/8 à fil enroulé renforcé par des lames longitudinales**.

Pour ce doublet, il apparaît cependant que **le design de la complétion semble avoir été adapté aux fonctions des puits et au sens de circulation du fluide géothermal**. Le constructeur met en avant l'effet de tuyère des fentes des crépines profilées en V, adaptées aux formations très fines et permettant d'éviter leur colmatage.

La Figure 18, extraite des annexes du DOE du forage P2 (fiches techniques, annexe 9) illustre cette adaptation.

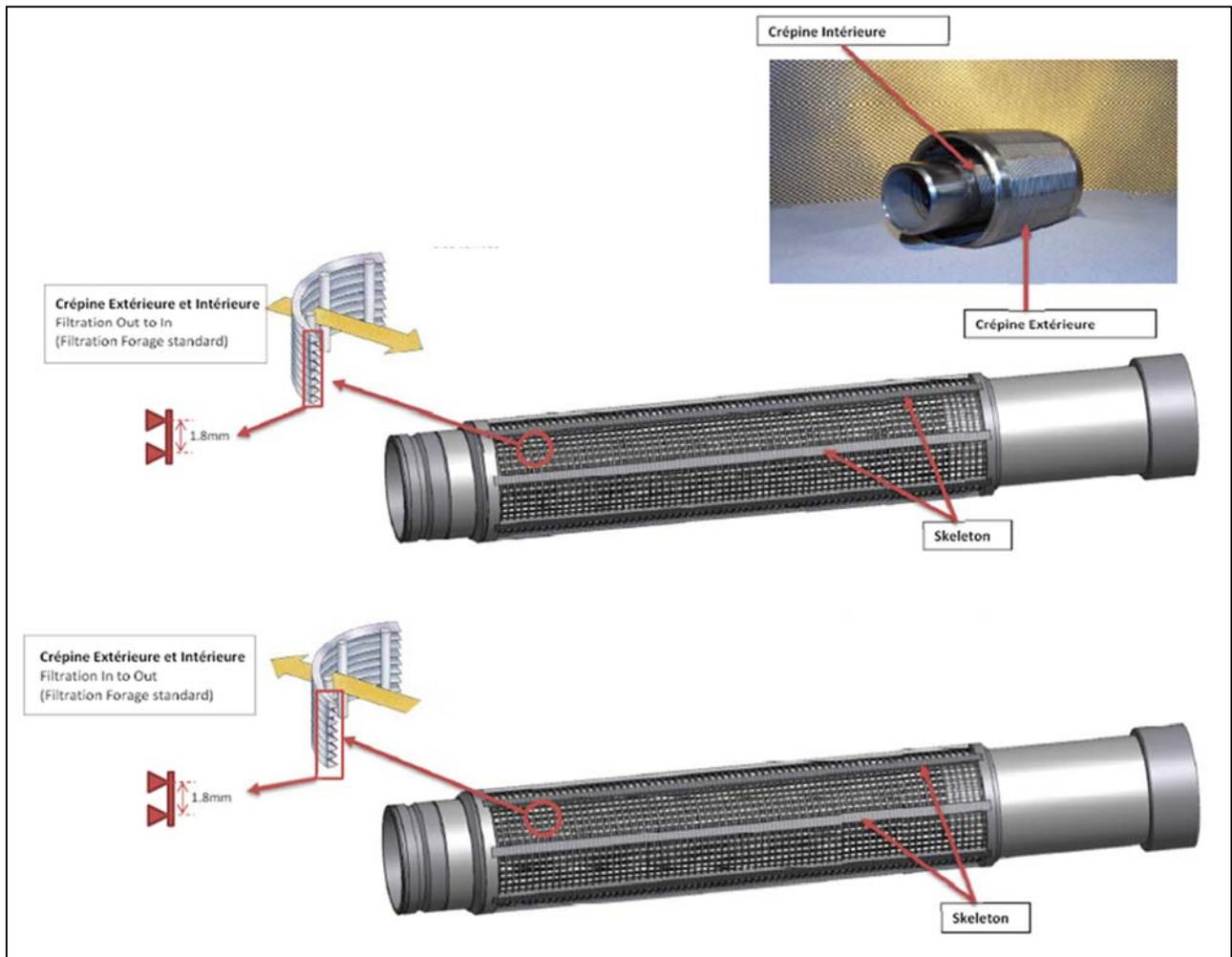


Figure 18 : Type de crépine adapté à la fonction des puits (production ou injection) mis en place pour le doublet de la ZAC Clichy-Batignolles.

Cette adaptation technique porte principalement sur la complétion du puits injecteur du doublet. Elle pose cependant une question relative au comportement de la crépine et au risque de colmatage lorsque le puits est mis en production pour les essais de pompage en fin de travaux, ou à l'occasion d'une opération de nettoyage du réservoir.

L'espace annulaire entre les parois a été préalablement garni de **billes de verre (calibre 1,25 à 1,65 mm)**. L'ouverture des crépines (slot) est de 1 mm et **la colonne captante est équipée de centreurs et de joints de raccordement diélectriques**.

Par rapport à la hauteur traversée dans le réservoir de 82 mètres pour P1 et de 75 mètres pour P2, les longueurs crépinées équivalentes pour les deux puits (57 mètres) représentent respectivement des ratios de 69,5% et 76%.

D'un point de vue lithologique, sous les argiles du Gault attribuées également à l'Albien, le réservoir est constitué de l'alternance des niveaux sableux et argileux reportée ci-dessous :

- **au puits P1 :**
 - o **Sables de Frécambault** : hauteur traversée de **21 mètres** (de 668 à 689 mètres forés) ;
 - o Argiles Tégulines : 13 mètres (de 689 à 702 mètres) ;
 - o **Sables des Drillons** : **36 mètres** (de 702 à 738 mètres) ;
 - o Argiles de l'Armanche : 3 mètres (de 738 à 741 mètres) ;
 - o **Sables verts** : **9 mètres** (de 741 à 750 mètres) ;

- **au puits P2 :**
 - o **Sables de Frécambault** : **26 mètres** (entre 665 et 691 mètres forés) ;
 - o Argiles Tégulines : 5 mètres (de 691 à 696 mètres) ;
 - o **Sables des Drillons** : **30 mètres** (de 696 à 726 mètres) ;
 - o Argiles de l'Armanche : 6 mètres (de 726 à 732 mètres) ;
 - o **Sables verts** : **8 mètres** (de 732 et 740 mètres).

Les résultats des analyses granulométriques effectuées à partir d'échantillons prélevés en cours de forage pour chaque niveau sableux sont présentés en annexe du DOE du forage producteur P-1. Sous réserve de la représentativité effective de ces échantillons, les niveaux perméables du réservoir correspondent à des sables fins (Sables des Drillons) et des sables moyens (Sables de Frécambault et Sables verts). **Les tamisages effectués montrent que plus de 90% des grains de sable ont une dimension inférieure à 1 mm (correspondant à l'ouverture des crépines) et que 6 à 9% des éléments ont une taille inférieure à 0,08 mm (soit 80 µm).**

Les niveaux producteurs ont été identifiés à partir des diagaphies du réservoir (flowmétrie, température et conductivité) réalisées en fin d'opération pour chaque puits, à des débits de production de 52 m³/h pour P1 et 60 m³/h pour P2.

A ces débits, relativement réduits, les contributions des niveaux producteurs s'établissent de la manière suivante :

- pour le **puits P1** (producteur), la **contribution majoritaire proviendrait des Sables des Drillons (47%)** sur une épaisseur importante proche de 22 mètres, puis des **Sables verts (36%)** sur une épaisseur réduite de l'ordre de 5 mètres, et des **Sables de Frécambault (17%)** sur une épaisseur intermédiaire de 11 mètres ;

- pour le **puits P2** (injecteur), les contributions au débit total s'inversent avec une **prédominance des Sables de Frécambault (56%) sur les Sables des Drillons (36%)** pour une épaisseur équivalente proche de 14 mètres, **les Sables verts ne contribuant que pour 8%** sur une épaisseur qui reste réduite à 5 mètres environ.

Les écoulements semblent continus sur la hauteur des Sables de Frécambault alors que les niveaux producteurs paraissent plus individualisés (1 à 3 niveaux) au sein des Sables des Drillons et des Sables verts. **Les épaisseurs totales des niveaux producteurs** (épaisseurs utiles cumulées) sont relativement proches : **37,6 mètres pour P1 et 33,9 mètres pour P2.**

La **température de 28,5°C** a été mesurée au niveau du réservoir du puits de production.

Suite aux travaux de forage, les phases de développement des ouvrages ont été réalisées de la manière suivante :

- Pour le **puits P2**, la première phase de **développement par air-lift** a été réalisée du 21 au 22/08/2014 sur une **durée de 30 heures** (débit maximal 194 m³/h) et le **développement par pompage** a été enchaîné sur une **durée de 20 heures**.
Compte tenu des valeurs obtenues de l'indice de productivité jugé faible (de l'ordre de 42 m³/h/bar), un **traitement à l'hexamétaphosphate** a été réalisé du 03 au 05/09/2014 après le déplacement de la machine de forage sur le puits P1 et l'installation de l'appareil de work-over (SK-11) sur le puits P2.
Il a ensuite été procédé à une **nouvelle phase de développement par air-lift pendant 6 heures et par pompage pendant 24 heures**.
- Pour le **puits P1**, une **première phase de développement à l'air-lift** a été réalisée du 11 au 14/10/2014 **sur une durée totale de 40 heures**, avec des débits variables atteignant la valeur maximale de 206 m³/h.
Suite à la résolution du second sinistre, une désinfection du puits a été effectuée (eau de Javel et bactéricide) juste avant de procéder à la **deuxième phase de développement par pompage**. Celle-ci a été réalisée du 29/11/2014 au 01/12/2014 sur une **durée totale de 16 heures**, avec des débits variables atteignant 230 m³/h au maximum. A ce stade, l'indice de productivité de l'ouvrage a été évalué à une valeur proche de 52 m³/h/bar.

Les essais de pompage ont été réalisés de la manière suivante :

- Pour le **puits P2**, les essais par paliers ont été menés du 10 au 11/09/2014, suivis par un pompage de longue durée du 11 au 14/09/2014 et la remontée de la nappe observée sur 24 heures du 14 au 15/09/2014.
Cinq paliers de débits (de 80 à près de 200 m³/h) **de 2h15, entrecoupés par des phases de remontée de la nappe de même durée**, ont permis de déterminer un **indice de productivité de 43 m³/h/bar, équivalent à l'indice obtenu avant le traitement par injection d'hexamétaphosphate**.
Le **pompage de longue durée** a été réalisé au **débit de 180 m³/h pendant près de 72 heures**, donnant un **indice de productivité final de 40 m³/h/bar**.
- Pour le **puits P1**, les essais par paliers ont été menés du 1^{er} au 02/12/2014, suivis par un pompage de longue durée du 02 au 05/12/2014 et la remontée de la nappe pendant près de 24 heures du 05 au 06/12/2014.
Six paliers de débits (de l'ordre de 80 à 230 m³/h) **de près de 2h, entrecoupés par des phases de remontée de la nappe de même durée**, ont permis de déterminer un **indice de productivité de 54 m³/h/bar**.
Le **pompage de longue durée** a été réalisé au **débit proche de 205 m³/h pendant un peu plus de 72 heures**, donnant un **indice de productivité final de 50 m³/h/bar**.

Les rapports de fin de travaux (DOE) réalisés par l'entreprise de forage ne présentent pas les interprétations des essais de pompage, les valeurs de transmissivité du réservoir ne sont donc pas mentionnées. De même, la réalisation d'un test d'injection du puits P2 n'est pas mentionnée. Durant les essais de pompage du puits P1, le niveau d'eau a été suivi au forage P2. Ce test d'interférence a montré un rabattement de l'ordre de 3,5 mètres au forage P2 à la fin de la phase des essais de production du puits P1.

3.4. LE RETOUR D'EXPERIENCES DES OPERATIONS A L'ALBIEN / NEOCOMIEN : UN APPRENTISSAGE EN COURS

Compte tenu de son ancienneté (1989) et de sa spécificité (chauffage et climatisation), il convient de distinguer l'opération des Tours AGF des opérations plus récentes (2011 – 2014) du Plessis-Robinson, d'Issy-les-Moulineaux et de Clichy-Batignolles.

3.4.1. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet des Tours AGF

Destiné à alimenter en chauffage et en climatisation les bureaux des tours AGF situés en bord de Seine à Paris (15^{ème} arrondissement), le doublet constitué par les puits B16 (puits chaud) et B20 (puits froid) a été initialement conçu selon le principe de réversibilité du flux au sein de la boucle géothermale.

Ce dispositif captant l'Albien à une profondeur de l'ordre de 500 mètres (température de 27°C) fonctionne depuis près de 26 ans, mais des difficultés d'injection dans le puits B16 ont été rencontrées dès les premiers essais de fonctionnement suivant le sens de circulation du puits froid vers le puits chaud, limitant de fait la capacité de climatisation des immeubles en période estivale.

Après l'équipement des puits réalisé en début d'année 1990, les premiers essais de fonctionnement de la boucle géothermale dans le sens B16 vers B20 (mode hiver – chauffage) n'ont pas présenté de difficultés, avec une pression de réinjection stable et inférieure à 2,5 bars en tête du puits B20 (débit et température d'injection non précisés).

Par contre, dans le sens B20 vers B16 (mode été – climatisation), les pressions d'injection sont montées très rapidement jusqu'à 8 bars en tête du puits B16 et la cavitation de la pompe immergée dans le puits B20.

Ce phénomène s'est reproduit malgré le traitement des deux puits par injection d'hexamétophosphate et **le problème semblait avoir été résolu, dans un premier temps, après avoir rejeté à l'égout pendant trois jours les eaux produites par le puits B20, avant de procéder à la réinjection dans le puits B16.** L'objectif était d'éviter que l'air stocké dans le réservoir lors de la réinjection dans le puits B20 provoque le colmatage apparent du puits B16 lors de l'inversion du flux.

Le doublet a fonctionné normalement lors de la période hivernale de 1990 – 1991 dans le sens B16 vers B20, et le problème est à nouveau apparu lors de l'inversion du sens de circulation, des prises d'air sur des purgeurs placés en surface ont alors été décelées.

Le dysfonctionnement qui serait lié à la réinjection d'air dans le réservoir ne semble donc se manifester que sur l'un des deux puits, alors qu'ils sont *a priori* soumis à cette même condition d'entrée d'air dans le système. Cette hypothèse ne semble donc pas suffisante pour expliquer la dissymétrie apparente du comportement du réservoir.

Compte tenu des difficultés d'injection du puits B16 et malgré la mise en place d'une unité de dégazage servant pour les deux puits, **le doublet ne semble avoir été principalement exploité que pour le chauffage des tours AGF**, avec le forage B16 utilisé comme puits producteur et le forage B20 comme injecteur.

En 2010, les bureaux d'études G₂H Conseils et CFG Services ont réalisé une étude de l'injection dans les aquifères sableux (étude initiée par l'exploitant (DALKIA) et financée conjointement par le demandeur, l'ADEME et le BRGM) qui confirme ce mode d'exploitation pour toute l'année 2009 et précise les **valeurs de la pression d'injection en tête de puits B20 : 4,6 bars à 100 m³/h et 5,5 bars à 130 m³/h.**

Cette dernière valeur semble correspondre au débit maximal enregistré pour l'exploitation, nettement inférieur au débit d'exploitation envisageable (de l'ordre de 200 m³/h) compte tenu des indices de productivité initiaux obtenus lors des tests de production réalisés jusqu'à 160 m³/h.

Suite aux tests hydrauliques réalisés en production et en injection sur les deux puits, et aux analyses physico-chimiques et bactériologiques effectuées à partir de prélèvements de fluides, **les conclusions de l'étude de 2010 ont mis en avant une origine vraisemblable et multiple du problème d'injectivité observé uniquement sur le puits B16 :**

- une **mauvaise conception de la complétion** du puits B16 pour lequel le **tube auxiliaire d'injection trop court** (30 mètres au lieu de 60 mètres pour le puits B20) provoquerait une aération différentielle du fluide injecté conduisant à **l'introduction de bulles d'air** dans le fluide ;
- **l'utilisation d'eau oxygénée (oxydant puissant) pour le développement du puits B20** à l'origine, s'il est démontré que le **fluide produit lors du dégorgeement a été directement réinjecté dans le puits B16** à l'issue du traitement. L'oxydation du fer ferreux en fer ferrique provoquant la précipitation d'oxyde de fer (Goethite), le fluide chargé provenant du puits B20 pourrait être à l'origine du colmatage des crépines et du proche réservoir du puits B16 ;
- une **mauvaise adaptation des ouvertures des crépines** utilisées (nervures repoussées), destinées préférentiellement à la production plutôt qu'à l'injection **qui provoquerait un dégazage** intempestif en fonction des débits injectés.

Ces conclusions écartent d'autre part les causes potentielles suivantes :

- la **migration de particules** par processus d'entraînement en raison de l'absence de corrélation entre le nombre de particules et le débit, et la présence en grande majorité de particules de très faible taille ;
- la **composition chimique du fluide** et les conditions de précipitation des espèces identifiées en raison de la faible influence des écarts de température sur les produits de solubilité des minéraux et des potentiels d'oxydo-réduction non favorables à la précipitation des espèces ;
- les **phénomènes bactériologiques** en raison de l'absence de bactéries dans les prélèvements ;
- le **piégeage de gaz** en raison de l'absence de gaz libres et d'une faible fraction gazeuse susceptibles d'entraîner des précipitations ;
- la **viscosité du fluide** liée aux variations de température.

Les conclusions de l'étude semblent minimiser **l'impact des vitesses de circulation du fluide au niveau des crépines directement lié à l'architecture des forages. Malgré des caractéristiques hydrauliques plus favorables**, qui tendent à réduire les pertes de charge de l'ouvrage (meilleure transmissivité du réservoir et diamètre supérieur du tubage), **le forage B16 vertical paraît nettement défavorisé par rapport au forage B20 dévié à 40° à cause de la réduction de l'ordre d'un quart de la longueur traversée par le forage au niveau des zones productrices.**

Ce rapport semble même beaucoup plus important lorsque l'on considère la différence de hauteur captante de l'aquifère (épaisseur des niveaux producteurs) évaluée à 19 mètres sur B16 et à 59 mètres sur B20. Suivant le rapport d'étude de 2010, la vitesse de circulation serait quasiment trois fois plus importante au niveau des crépines de B16 (1,5 cm/s) par rapport à celle de B20 (0,6 cm/s) pour un débit de 100 m³/h. **Le seuil de 1 cm/s** déjà évoqué dans l'analyse du fonctionnement des opérations danoises **serait donc dépassé pour le puits B16 avec des conséquences pouvant conduire à la déstabilisation du proche réservoir et au colmatage des crépines** (Solages, 1979). Par conséquent, les tests de production initiaux, menés à un débit encore supérieur (160 m³/h) pourraient donc être à l'origine de la déstabilisation du réservoir au niveau du puits B16. Celui-ci aurait pu ensuite fonctionner jusqu'à un débit de production maximal de 130 m³/h (suivi de l'année 2009), limité par les pertes de charge quadratiques de l'ouvrage, et à un débit d'injection encore plus limité par la pression d'injection liée à la déstabilisation du réservoir réduisant la perméabilité du proche réservoir lors de l'inversion du flux.

Le débit critique en injection évalué en 2010 pour le puits B16 à une valeur proche de 80 m³/h pourrait être une conséquence de la dégradation initiale des propriétés hydrauliques du réservoir et des phénomènes aggravants identifiés précédemment. Ceux-ci pourraient être complétés par les conséquences de **l'absence d'un tube plein au droit du niveau argileux intermédiaire** (argiles de Tegulines) dans la complétion du puits B16 contrairement à celle du puits B20.

Cette analyse globale met en avant la **nécessité d'améliorer la conception** :

- **des éléments de complétion** pour éviter la dégradation de l'injectivité d'un puits avec notamment :
 - o le positionnement adapté des tubes pleins au droit des niveaux argileux intermédiaires pour éviter de faciliter l'entrée de particules fines dans la boucle géothermale et le colmatage des crépines ;
 - o une longueur suffisante du tube auxiliaire d'injection afin d'éviter l'oxygénation du fluide géothermal réinjecté ;
 - o des ouvertures de crépine adaptées pour empêcher le dégazage du fluide ;
- **des programmes de développement du réservoir** (nature des réactifs utilisés pour le nettoyage ou la stimulation du réservoir et rejet des eaux produites) **et des essais de production** (contrôle des débits en fonction du débit critique de l'ouvrage et/ou du seuil critique de 1 cm/s).

3.4.2. Principaux enseignements des exploitations des doublets d'Issy-les-Moulineaux, du Plessis-Robinson et de Clichy-Batignolles

Pour ce qui concerne le fonctionnement des opérations plus récentes d'Issy-les-Moulineaux, du Plessis-Robinson et de Clichy-Batignolles, le retour d'expériences reste à ce jour limité à une durée d'exploitation inférieure à cinq ans. Ces installations fonctionnent et nécessitent des adaptations techniques pour optimiser leur exploitation.

Pour le doublet d'Issy-les-Moulineaux, à partir d'une **température de production de 28°C**, **l'aquifère de l'Albien capté à une profondeur de l'ordre de 600 mètres** permet de couvrir 78% des besoins en chauffage et eau chaude sanitaire de 1 600 logements de l'éco-quartier (SIGES Seine Normandie), réhabilité en 2012 et comportant des Bâtiments Basse Consommation (BBC) parfaitement adaptés au chauffage par géothermie basse température.

Compte tenu des très bonnes caractéristiques du réservoir et de la complétion du forage de production limitant la **vitesse de circulation du fluide au travers des crépines (évaluée en moyenne à 0,8 cm/s**, mais pouvant localement dépasser 3 cm/s au droit des niveaux les plus productifs et/ou de faible épaisseur), le **débit d'exploitation visé de 200 m³/h** pouvait être atteint après la réalisation des travaux de forage en 2011 et 2012.

Avec une température de réinjection de l'ordre de 13°C, la **puissance thermique du dispositif est évaluée à une valeur proche 3,5 MW**.

Les difficultés de réinjection liées au problème technique de circulation par l'annulaire du forage producteur du fluide géothermal chargé en particules fines, **ont conduit cependant à procéder en 2015 à des travaux complémentaires** portés sur la reprise de la complétion du forage producteur ILM-1.

Le programme de travaux comportait la réalisation des tâches suivantes :

- la pose d'un cône au sommet du tubage 13''3/8 (base de la chambre de pompage) pour faciliter la descente des outils ;
- la **pose d'une colonne d'extension en acier 8''5/8 d'une longueur de 30 mètres permettant d'augmenter la réserve de graviers au-dessus du liner-hanger** (une hauteur finale de 45,7 mètres a donc été aménagée au-dessus du toit du réservoir au lieu de 15,7 mètres initialement) ;
- le **remplissage complet de l'annulaire de la colonne captante par des graviers** siliceux (calibre 0,8 – 1,4 mm) ;
- le développement du forage avec air-lift (débit 180 m³/h) pour évacuer les dépôts et un pistonnage pour bien positionner le massif de graviers ;
- une inspection vidéo, puis un pompage d'essai au débit nominal et un test d'injection final.

Ces travaux complémentaires de 2015 semblent avoir résolu les problèmes constatés en 2012.

Le retour d'expérience du Maître d'ouvrage Délégué (DALKIA) et du Maître d'œuvre (G2H Conseils) relatif à l'exploitation du doublet à l'Albien d'Issy-les-Moulineaux, présenté le 31/05/2016 lors du Comité Technique de la Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP), a mis en évidence la **nécessité d'améliorer les techniques et les pratiques** portant sur :

- le **diagnostic approfondi des ouvrages** avant toute intervention sur les puits (inspection vidéo, mesures et tests de pompage,...) ;

- la **mise en place de nouveaux moyens de filtration plus efficaces**, intégrant une problématique liée à la représentativité des échantillons, afin de mieux définir les risques et anticiper les contraintes d'exploitation ;
NB : une **filtration à 130 µm** serait mise en œuvre pour le doublet d'Issy-les-Moulineaux probablement en amont des échangeurs. Comparativement, les exploitations aux Pays-Bas sont équipées de filtres (« *candle filters* ») à 1 ou 2 µm positionnés en amont et en aval des échangeurs. L'impact économique serait à calculer sur l'ensemble de la durée de vie du dispositif.
- le **suivi régulier du comportement des puits et la modulation des débits**, comprenant une supervision plus simple et accessible à distance (alertes), la sensibilisation des équipes d'intervention, ainsi qu'un suivi hydrogéologique plus efficace ;
- la **sensibilisation de la collectivité** vis-à-vis des interventions nécessaires tout au long de la vie du doublet et la nécessité de maintenir une aire d'intervention suffisante autour des têtes de puits.

Réalisé en 2012, **les forages du doublet géothermique du Plessis-Robinson captent l'aquifère du Néocomien à une profondeur de l'ordre de 900 mètres**. Ce dispositif permet de couvrir les besoins énergétiques d'un réseau de chaleur qui alimente des bâtiments rénovés, comprenant environ 3500 logements et plusieurs équipements publics (source : SIGES Seine Normandie) à partir d'une **température de la ressource proche de 38°C**.

Cette opération correspond à la première expérience ciblant le réservoir géothermal du Néocomien.

En 2013, suite à une phase d'essais de la boucle géothermale de mars à juin, puis d'une phase d'arrêt estivale de juin à septembre, la phase d'exploitation hivernale d'octobre à décembre a montré un **comportement stable et symétrique des puits** (productivité et injectivité équivalentes des ouvrages à une valeur de 31 m³/h/bar) **pour le débit d'exploitation de 200 m³/h correspondant au débit prévisionnel maximal**. Compte tenu du niveau statique de la nappe (de l'ordre de 100 mètres sous le niveau du sol) la réinjection est effectuée de manière gravitaire, le niveau dynamique s'établissant à la profondeur de 35 mètres au puits injecteur LPR-2.

Le fonctionnement de l'exploitation, équipée de deux filtres cycloniques de maille 100 µm, a été perturbé par une fréquence élevée des opérations de nettoyage des filtres (4 par semaine) fin 2013. Le colmatage des filtres serait lié à la **présence dans le fluide de particules métalliques** plutôt qu'à celle de sables ou de particules argileuses. Des **pièges magnétiques ont été mis en place en 2014** et semblent avoir été efficaces. L'origine des particules métalliques restait à être identifiée.

L'opération géothermique de la ZAC de Clichy-Batignolles (Paris 17^{ème}), réalisée en 2014, vise un taux de couverture par la géothermie de 83% des besoins en chaleur d'un nouvel éco-quartier (21 000 MWh/an pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire) à partir de **l'aquifère de l'Albien** rencontré à une **profondeur de l'ordre de 700 mètres**.

A partir d'une ressource à 28°C, une température d'injection de 10°C et un débit d'exploitation de 180 m³/h, la puissance prévisionnelle du dispositif serait de **3,8 MW**.

4. Synthèse des retours d'expériences des opérations du Trias et de l'Albien / Néocomien et préconisations

4.1. PRECONISATIONS A PROPOS DU TRIAS PROFOND

Les opérations relativement anciennes du Trias, datant du début des années 80, ont démontré la difficulté d'appliquer, sans adaptation, les solutions techniques valables au Dogger (Boisdet et al., 1989) alors que les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir et les valeurs de transmissivité notamment (sites de Melleray et d'Achères) sont relativement bonnes (10 à 15 D.m) et comparables aux valeurs basses du Dogger ou du site de Copenhague par exemple.

L'analyse des opérations suivant l'ordre chronologique des réalisations fait apparaître des évolutions techniques et pratiques mises en œuvre lors des travaux de forage ciblant le Trias, en particulier entre les deux premières opérations (Melleray et Cergy-Pontoise) et les deux plus récentes (Achères et Châteauroux). Ces évolutions sont notamment les suivantes :

- l'aménagement d'une chambre de pompage plus profonde (389 mètres à Achères contre 300 mètres à Melleray et Cergy-Pontoise) afin de tenir compte de la productivité relativement faible du réservoir dans un secteur qui n'est probablement pas le plus favorable ;
- la mise en place d'un massif filtrant dans l'annulaire de la colonne captante ;
- des essais de production de longues durées (plusieurs jours) comprenant un test d'interférence entre les puits du doublet.

A l'issue de l'analyse chronologique des opérations, les préconisations relatives à la réalisation de nouveaux projets d'exploration au Trias correspondent sont détaillées ci-dessous.

4.1.1. Stratégie d'exploration

D'un point de vue stratégique, la réalisation d'une nouvelle opération au Trias nécessite de trouver des moyens permettant d'optimiser les chances de succès et de réduire l'impact négatif d'un échec prévisible compte tenu du caractère exploratoire de ce type d'opération. La mise en œuvre de nouvelles techniques et pratiques s'avère nécessaire (études complémentaires sismiques et hydrogéologiques, ingénierie de forage).

En termes de structuration, l'organisation du projet doit permettre de clarifier le rôle et les responsabilités des acteurs dès l'amont afin de faciliter la prise de décisions et le déroulement de l'opération.

4.1.2. Phases de conception du dispositif et de réalisation des travaux

D'un point de vue technique, les phases de conception du dispositif et de réalisation des travaux doivent intégrer la possibilité d'affecter la fonction des puits (producteur, injecteur) *a posteriori* selon les caractéristiques hydrogéologiques les plus favorables du réservoir, et prévoir une complétion au diamètre le plus grand possible (réduction des pertes de charge) équipée d'un massif filtrant. A ce stade, le type de complétion reste en débat. Une colonne Inox à fil enroulé et un auto-gravillonnage pourrait être privilégiée suivant la tendance constatée notamment au Pays-Bas.

4.1.3. Phase d'exploitation

En termes d'exploitation, l'implantation des têtes de puits les plus proches possibles de la centrale géothermique, le traitement anti-corrosion et le maintien en pression de la boucle géothermale sont des pratiques généralisées à l'ensemble des dispositifs actuels au Dogger, à adapter pour le fluide du Trias.

Un protocole de traitement physique et chimique du fluide avant sa réinjection (dégazage, oxydation, décantation, filtration), proposé suite à l'expérience de Melleray, serait à comparer d'un point de vue technico-économique à la solution d'injection d'azote mise en œuvre au Danemark et aux Pays-Bas.

Le personnel d'exploitation doit être sensibilisé vis-à-vis notamment des modifications du régime de débit lors des opérations de redémarrage et d'arrêt des installations afin d'éviter les changements brutaux (coup de bélier). Ce problème persiste néanmoins en cas de pannes subites des pompes équipant la boucle géothermale.

L'adaptation des moyens de production et d'injection (pompes et filtres en surface notamment) s'avère nécessaire afin d'optimiser l'exploitation de la ressource en fonction des difficultés potentielles initiales et éviter une dégradation progressive.

Financièrement, une opération de décolmataje des crépines, voire de reprise de la complétion, serait à prévoir en cas de forte dégradation des caractéristiques hydrauliques des puits ou d'avarie importante.

4.2. PRECONISATIONS A PROPOS DE L'ALBIEN – NEOCOMIEN SUPERFICIEL

Pour le réservoir géothermal correspondant aux aquifères multi-couches de l'Albien et du Néocomien, moins profonds et mieux connus que le Trias (caractère exploratoire et risque nettement inférieurs), le retour d'expériences relativement récent confirme les très bonnes caractéristiques hydrogéologiques du réservoir (de l'ordre de 200 à 600 D.m) et la possibilité d'exploiter la ressource à un débit de l'ordre de 200 m³/h, tout en respectant les contraintes relatives à un usage des puits pour un secours éventuel en alimentation d'eau potable.

Il apporte en outre des informations complémentaires concernant notamment :

- l'évolution des complétions en acier inoxydable mises en place (colonne captante à double paroi pré-gravillonnée, équipements diélectriques) avec la possibilité d'adapter la nature de la crépine en fonction du sens d'écoulement du fluide dans l'ouvrage (production ou injection) ;
- les durées importantes (plusieurs semaines) nécessaires consacrées aux phases de développement, de nettoyage et d'essais, réalisées après la démobilisation de la machine de forage et la mise en place d'un appareil de work-over plus léger ;
- la mise en place d'un système de filtration du fluide au cours des essais de réinjection (hydrocyclone).

Indépendamment de la nature des réservoirs ciblés, les opérations de forages géothermiques profonds sont confrontées à des problèmes techniques spécifiques, liés notamment au contexte urbain de réalisation (durée et difficultés accentuées pour des travaux devant être interrompus la nuit et les week-ends), à la déviation des forages et aux diamètres importants des tubages qui peuvent générer des difficultés particulières notamment lors des opérations de cimentation. La

présence permanente d'une ingénierie spécialisée s'impose en particulier pour la gestion des fluides de forage et les essais hydrogéologiques.

Par contre, de manière spécifique à l'exploitation des réservoirs clastiques, le retour d'expériences relatif aux opérations d'Issy-les-Moulineaux et du Plessis-Robinson présenté par le Maître d'ouvrage et le Maître d'œuvre met en évidence la nécessité d'améliorer les techniques et les pratiques portant sur le diagnostic des ouvrages, le développement des moyens de filtration (100 μm actuellement), la sensibilisation à différents niveaux des équipes de suivi et de maintenance des équipements et de la collectivité.

Pour ce qui concerne la filtration, le système mis en place et généralisé pour les exploitations hollandaises (filtration à 1 μm en amont et en aval des échangeurs) pourrait également être étudié d'un point de vue technico-économique, sachant que 90% des grains de sable de l'Albien / Néocomien auraient une taille inférieure à 1 mm (ordre de grandeur des ouvertures de crépines) et que 10% de ces éléments seraient inférieurs à 80 μm .

5. Bibliographie

A. Boisdet, J.P. Cautru, I. Czernichowski-Lauriol, S. Detoc, J.C. Foucher, C. Fouillac, J.L. Honegger, J.C. Martin, F.D. Vuataz (1989) – Projet Trias. Expérimentations en vue de la réinjection de saumures géothermales dans les grès du Trias profond. Rapport 89SGN1413E/IRG, 108 p., 35 fig., 16 tabl.

V. Bouchot, A. Bialkowski, S. Lopez, A. Ossi et collaborateurs (2008) – Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris. Rapport final BRGM - RP-56463-FR, 92 p., 40 fig., 3 tabl., 1 ann.

V. Bouchot, A.G. Bader, A. Bialkowski, D. Bonté, B. Bourguine, S. Caritg, C. Castillo, C. Dezayes, S. Gabalda, L. Guillou-Frottier, S. Haffen, V. Hamm, C. Kervévan, S. Lopez, M. Peter-Borie et collaborateurs (2012) – CLASTIQ-2 : programme de recherche sur les ressources géothermales des réservoirs clastiques en France (Bassin de Paris et Fossé Rhéna). Rapport final du projet. BRGM/RP-61472-FR, 197 p., 80 fig., 9 tabl., 2 ann.

J.Y. Hervé, I. Ignatiadis (2007) – Nappes de l'Albien et du Néocomien. Définition des conditions d'accès à la ressource géothermique en Ile-de-France. Rapport final. BRGM/RP-55990-FR, 55p.

M.L. Hjuler, H. Vosgerau, C.M. Nielsen, P. Frykman, L. Kristensen, A. Mathiesen, T. Bidstrup, L.H. Nielsen (2014) – A multidisciplinary study of a geothermal reservoir below Thisted, Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 31, p. 51-54.

Disponible sur : http://www.geus.dk/DK/publications/geol-survey-dk-gl-bull/31/Documents/nr31_p51-54.pdf.

S. Lopez et R. Millot et collaborateurs (2008) – Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris. Rapport BRGM/RP-56630-FR, 197 p., 65 ill.

A. Mathiesen, L. Kristensen, C.M. Nielsen, R. Weibel, M.L. Hjuler, B. Rogen, A. Mahler, L.H. Nielsen. (2013) – Assessment of sedimentary geothermal aquifer parameters in Denmark with focus on transmissivity, European Geothermal Congress 2013, 9p.

Disponible sur :

http://www.geotermi.dk/media/2040591/EGC2013-Assessment_Geothermal_Aquifer_Mathiesen_etal_2013.pdf.

Seguin J.J., Castillo C., Arnaud L. (2015) – Modélisation des nappes de l'Albien et du Néocomien. Rapport final. BRGM/RP-64873-FR, 274 P., 152 fig., 21 tabl., 8 ann.

S. Solages (1979) – Calcul des ouvrages de captage - Choix et caractéristiques des colonnes de captage. Rapport BRGM/79SGN727HYD, 72 p., 17 fig., 3 ann.

J.G. Veldkamp, H. Mijnlief, M. Bloemsa, R. Donselaar, S. Henares, A. Redjosentono, G.J. Weltje (2015) - Permian Rotliegend reservoir architecture of the Dutch Koekoespolder geothermal doublet. Proceedings World Geothermal Congress 2015. 5 p.

Disponible sur : <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/12085.pdf>

J.F. Vernoux, A. Genter, C. Vinchon et al. (1997) – Improvement of the injectivity index of argillaceous sandstones. European Communities JOULE Program Final report n° JOU2-CT92-0125 and 0183

J.F. Vernoux, P. Maget, H. Afzali, R. Blanchin, M. Donsimoni, J. Vairon (1997) – Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris, rapport BRGM DSGR/IDF R39702, 93 pages, 2 tableaux, 37 figures, 23 planches, 12 annexes.

T.H. Wong, D.A.J. Batjes, J. de Jager (2007) – Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Geology of the Netherlands, Geothermal Energy p. 341 – 346.

Disponible sur :

http://geothermie.nl/fileadmin/user_upload/documents/bestanden/Engels/Geology_of_The_Netherlands.pdf

Informations extraites du SIGES Seine Normandie :

- site Internet : <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article253>

+ DOE des ouvrages consultés.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr