

Document public

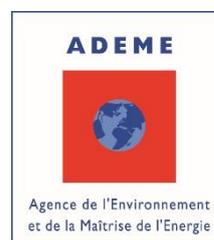
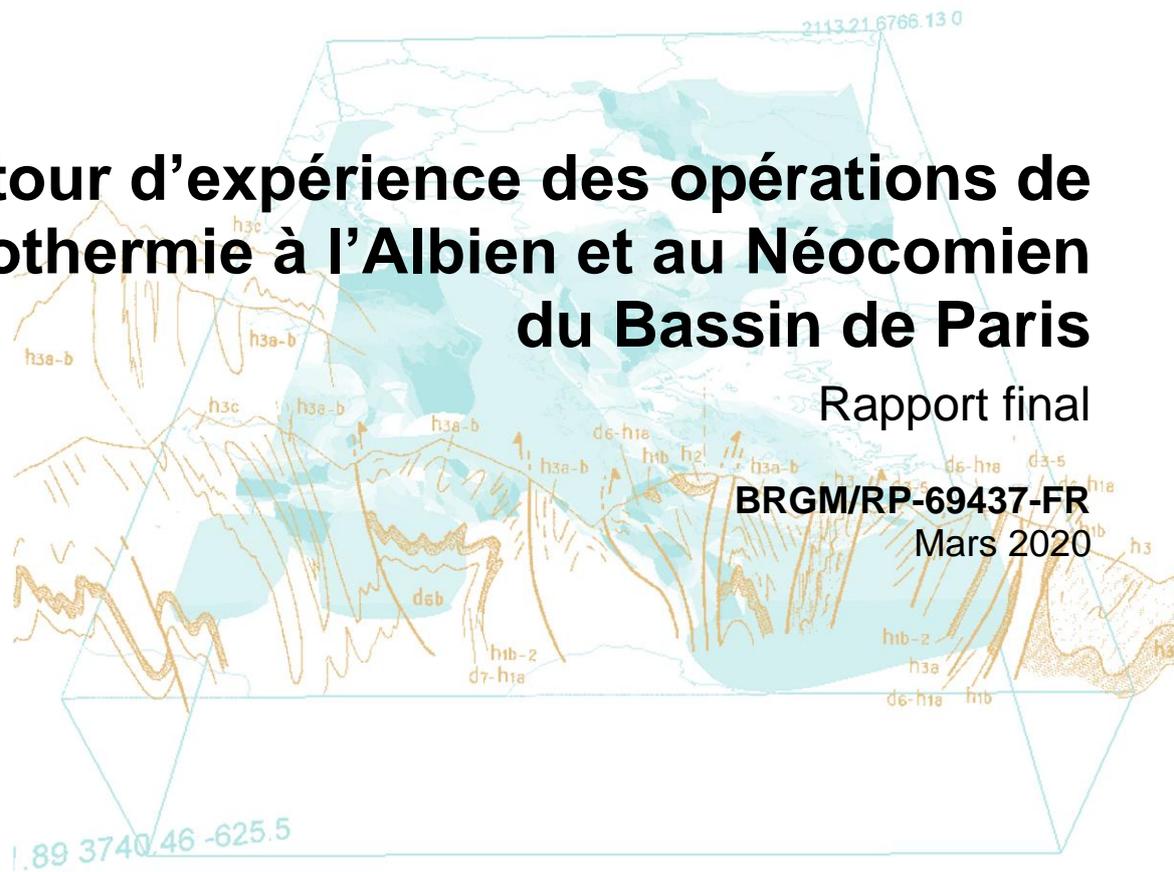


Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris

Rapport final

BRGM/RP-69437-FR

Mars 2020



Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris

Rapport final

BRGM/RP-69437-FR

Mars 2020

Étude réalisée dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM
n° 1805C0054

Maurel C., Bugarel F. et Hamm V.

Vérificateur :

Nom : Sanjuan B.

Fonction : Chef d'unité DGR/REG

Date : 08/04/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : Rocher P.

Fonction : Directeur adjoint DGR

Date : 10/04/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Albien, Néocomien, Géothermie, Forage, Retour d'expérience, Colmatage, Particule

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Maurel C., Bugarel F., Hamm V. (2020) – Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris. Rapport final BRGM/RP-69437-FR, 134 p., 41 fig., 28 tab., 2 ann.

Synthèse

Ce rapport constitue le livrable final du projet AFIA de la convention nationale ADEME-BRGM 2019 n° 1805C0054.

Le projet AFIA a pour objectif d'appuyer la filière pour répondre aux problématiques de baisse de performance observées sur les puits d'injection, au niveau des opérations de géothermie, à l'Albien et au Néocomien, dans le Bassin de Paris. Le projet a ainsi été structuré en trois volets :

1. l'animation du comité technique rassemblant les bureaux d'études et opérateurs du secteur de la géothermie sur les problématiques d'injectivité et de colmatage des puits d'injection ;
2. la réalisation du retour d'expérience des exploitations de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris et des opérations ciblant des formations sableuses en Europe ;
3. des recommandations et préconisations sur les solutions préventives (en particulier, pour de nouveaux projets) et curatives (pour les opérations existantes) qui pourraient être mises en place.

Le retour d'expérience comprend une synthèse basée sur l'analyse des cinq opérations de géothermie exploitant l'aquifère de l'Albien : opérations des Tours AGF, d'Issy-les-Moulineaux, de Clichy-Batignolles, de Saclay - ZAC du Moulon et Polytechnique, et de l'opération exploitant le Néocomien au Plessis-Robinson. Pour chacune de ces opérations, des informations techniques ont été collectées au cours du projet (rapport de fin de forage, diagnostic des ouvrages, programme de travaux, chronique d'exploitation, analyses d'échantillons de fluide ou granulométriques, etc.). Les échanges avec les bureaux d'études et opérateurs de la géothermie, lors des comités techniques, ont également permis d'alimenter le retour d'expérience et les réflexions autour des solutions envisageables.

Les données recueillies ont été synthétisées sous forme de base de données présentant les caractéristiques relatives aux forages, à leur développement et à l'exploitation des doublets. Ces éléments viennent compléter l'inventaire initié dans le cadre du projet GUIDOCLAST (Bugarel et al., 2018). Le tableau de synthèse, présenté en Annexe 2 de ce rapport, a servi de base pour la réalisation du retour d'expérience.

L'analyse technique des opérations géothermiques exploitant les aquifères sableux de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris confirme que la cause principale des pertes de performances des doublets est liée à la dégradation de l'injectivité des puits injecteurs. Le colmatage plus ou moins rapide de ces puits est très probablement dû au transfert de particules fines provenant des puits producteurs. Pour la totalité des opérations réalisées en Ile-de-France (6), les difficultés d'injection ont été rencontrées dès les phases initiales de développement et d'essais de pompage des ouvrages, et se poursuivent, voire se détériorent, lors de l'exploitation des doublets. Les endommagements du réservoir, dans un rayon proche du puits injecteur, peuvent être plus importants pour certains cas où les opérations de remédiation (rétro-lavage en particulier) semblent avoir un effet limité.

Les recommandations formulées ont pour objectifs de proposer des solutions préventives (en particulier pour de nouveaux projets) et curatives (pour les opérations existantes) Elles n'ont pas pour vocation d'être considérées comme des prescriptions mais bien comme une aide aux professionnels de la géothermie et acteurs de la filière, pour les projets actuels de l'Albien et du Néocomien en difficultés ainsi que pour les porteurs de nouveaux projets de géothermie dans ce type d'environnement silico-clastique. Les recommandations visent notamment à :

- limiter l'entrée des particules fines dans le puits de production et leur transfert vers les ouvrages de réinjection ;
- éviter le colmatage des ouvrages injecteurs ;
- restaurer les performances des doublets.

Les recommandations intègrent le rappel des bonnes pratiques à mettre en œuvre pour la réalisation des projets de géothermie ciblant des aquifères sableux (formations clastiques), depuis la phase de conception des doublets et la réalisation des travaux de forages (en particulier pour ce qui concerne les complétions), la caractérisation du réservoir, le développement des puits et les essais de pompage, jusqu'à l'exploitation des dispositifs (Hamm *et al.*, 2019).

Pour les exploitations actuelles, les principales préconisations sont :

- **l'adaptation des débits d'exploitation aux débits admissibles des ouvrages (basée sur les dimensionnements des ouvrages, vitesses critiques et vitesses d'entrée de crépine) ;**
- **la mise en place de filtrations suffisamment fines en surface ;**
- **la mise en place des rétro-lavages des ouvrages d'injection** (si le dimensionnement des crépines le permet).

L'opération de rétro-lavage vise à favoriser la mobilisation des particules provenant du puits de production ou endogènes et ayant progressivement colmaté les crépines et massifs filtrants du puits d'injection et les pores du réservoir, dans l'environnement du proche puits. Elle doit se faire à un débit équivalent ou supérieur, de préférence, au débit d'exploitation (la marge de + 10 % est généralement admise) et il est primordial d'éviter les variations brutales de pression (surpression ou sous-pression), en particulier les arrêts brusques pouvant déstabiliser les formations et être à l'origine de colmatages additionnels. Le rétro-lavage peut être mis en place par pompage assisté par air-lift ou par pompage simple. Une vigilance particulière devra être apportée au démarrage de la production assistée par air-lift pour éviter l'oxygénation de la boucle géothermale, et des aménagements, en surface et dans le puits, peuvent être nécessaires.

L'effet positif du rétro-lavage sur les performances des doublets de l'Albien et du Néocomien, et plus généralement sur les exploitations des aquifères sableux reste cependant à démontrer, notamment sur la durée. En revanche, cette mesure semble être rapide à mettre en place et peu coûteuse, du point de vue du matériel nécessaire et du temps d'interruption des opérations. Elle a pu faire ses preuves sur le doublet de Clichy-Batignolles, et des phases de tests opérationnels pourraient être poursuivies sur ce site et développées sur d'autres pour vérifier l'efficacité de cette technique sur le long terme.

La poursuite des suivis des paramètres hydrauliques, physico-chimiques, bactériologiques et particuliers, au niveau des exploitations, est également primordiale pour l'évaluation du risque de colmatage des ouvrages. C'est avec l'analyse de ces éléments que les diagnostics des ouvrages sont aujourd'hui possibles.

Pour les exploitations futures, outre les préconisations énumérées pour les opérations actuelles, les principales recommandations portent sur :

- la nécessité de définir l'usage des ouvrages injecteur ou producteur, seulement suite aux développements des forages et estimations des indices d'injectivité et de productivité (essai de pompage, flowmétrique) ;

- le fait de dimensionner en conséquence les crépines et massifs filtrants de façon à être compatible avec l'injection et la production dans chaque ouvrage ;
- le respect des bonnes pratiques, en matière de conception des ouvrages et de dimensionnement des éléments constitutifs (diamètre, tubage, complétions) en fonction des caractéristiques des formations (granulométrie) et des conditions d'exploitation envisagées, ainsi que le respect des bonnes pratiques en matière de développement et d'essai de pompage, en privilégiant des montées en débit progressives ;
- la possibilité d'aménager l'ouvrage injecteur et les installations en surface pour faciliter les opérations de nettoyage et rétro-lavage ;
- la réalisation des travaux par une entreprise expérimentée dans le secteur de la géothermie, l'intervention d'une ingénierie spécialisée pour la gestion des fluides de forage et pour les essais hydrogéologiques et le contrôle de la réalisation des travaux.

Sommaire

1. Présentation du projet AFIA	13
1.1. CONTEXTE ET ENJEUX.....	13
1.2. OBJECTIF DU PROJET	13
1.3. TÂCHES DU PROJET	13
1.4. LIVRABLES DU PROJET	14
2. État des connaissances relatives aux aquifères de l'Albien et du Néocomien.....	15
2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE CES AQUIFÈRES STRATÉGIQUES ET DES CONTRAINTES D'USAGE POUR LA GÉOTHERMIE	15
2.2. CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE DE L'ALBIEN ET DU NÉOCOMIEN.....	18
2.3. CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DE L'ALBIEN ET DU NÉOCOMIEN .	20
3. Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et Néocomien du Bassin de Paris	31
3.1. OPÉRATION DES TOURS AGF (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 1990	32
3.1.1. Contexte et problématique de l'opération.....	32
3.1.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération	33
3.1.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation	39
3.1.4. Enseignements et préconisations relatives à l'opération des Tours AGF	42
3.2. OPÉRATION D'ISSY-LES-MOULINEAUX (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 2013	44
3.2.1. Contexte et problématique de l'opération.....	44
3.2.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération	45
3.2.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation	53
3.2.4. Enseignements et préconisations relatifs à l'opération d'Issy-les-Moulineaux.....	57
3.3. OPÉRATION DU PLESSIS-ROBINSON (NÉOCOMIEN) MISE EN SERVICE EN 2013	60
3.3.1. Contexte et problématique de l'opération.....	60
3.3.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération	60
3.3.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation	67
3.3.4. Enseignements et préconisations relatives à l'exploitation du doublet	70
3.4. OPÉRATION DE CLICHY-BATIGNOLLES (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 2016.....	73
3.4.1. Contexte et problématique de l'opération.....	73
3.4.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération	73
3.4.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation	81

3.4.4. Enseignements et préconisations relatives à l'exploitation du doublet	83
3.5. OPÉRATIONS DE PARIS-SACLAY (ALBIEN) MISES EN SERVICE EN 2019 ET 2020	84
3.5.1. Contexte et problématique des deux opérations de Saclay	84
3.5.2. Analyse des caractéristiques techniques des opérations	85
3.5.3. Premières observations et recommandations pour l'exploitation du doublet.....	97
4. Retour d'expérience international.....	99
4.1. RETOUR D'EXPÉRIENCE AUX PAYS-BAS ET AU DANEMARK (PROJET GUIDOCLAST, 2016-2018).....	99
4.2. AUTRES EXPÉRIENCES EN MATIÈRE DE BAISSSE D'INJECTIVITÉ	100
5. Recommandations pour améliorer les conditions d'exploitation relatives aux opérations géothermiques de l'Albien et du Néocomien (Bassin de Paris)	103
5.1. PRÉCONISATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES OUVRAGES ET À LA RÉALISATION DES TRAVAUX	104
5.2. PRÉCONISATIONS RELATIVES À LA CARACTÉRISATION DU RÉSERVOIR, AU DÉVELOPPEMENT DES PUIITS ET AUX ESSAIS DE POMPAGE	110
5.2.1. Caractérisation du réservoir	110
5.2.2. Préconisations pour le développement des puits	110
5.2.3. Préconisations pour la réalisation des essais de pompage	113
5.3. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION DES DOUBLETES GÉOTHERMIQUES	115
5.3.1. Préconisations générales.....	115
5.3.2. Paramètres bactériologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, charge particulière de l'eau : définir l'état initial de l'exploitation	115
5.3.3. Suivi de l'exploitation	116
5.3.4. Rétro-lavage	116
5.3.5. Filtration.....	119
6. Conclusions et perspectives	123
7. Bibliographie	125

Liste des figures

Figure 1 : Extension et profondeur (en mètres NGF) du toit de l'aquifère de l'Albien (Seguin <i>et al.</i> , 2015) et localisation des opérations de géothermie profonde.	16
Figure 2 : Extension et profondeur (en mètres NGF) du toit de l'aquifère du Néocomien (Seguin <i>et al.</i> , 2015) et localisation des opérations de géothermie profonde.	17
Figure 3 : Lithostratigraphie du Bassin parisien (Perrodon <i>et al.</i> , 1990).	18
Figure 4 : Coupe schématique des passages de faciès du Valanginien, Hauterivien et Barrémien, depuis l'affleurement de l'Yonne jusqu'au centre du Bassin de Paris (Mégny <i>et al.</i> , 1980). ..	19
Figure 5 : Extension des entités hydrogéologiques du Gault, de l'Albien, de l'Aptien-Barrémien et du Néocomien (source : BD LISA).	21
Figure 6 : Carte piézométrique de l'Albien à l'échelle du Bassin parisien (Seguin <i>et al.</i> , 2015 ; Vernoux <i>et al.</i> , 1997).	22
Figure 7 : Carte piézométrique de l'Albien et sens d'écoulement à gauche, et localisation des thermométries existantes et nouvelles à droite (Dupaigne <i>et al.</i> , 2019).	23
Figure 8 : Cartes des principales caractéristiques de l'Albien du Bassin de Paris (toit, mur, température et transmissivité) (Seguin <i>et al.</i> , 2015).	25
Figure 9 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Albien (Seguin <i>et al.</i> , 2015).	26
Figure 10 : Carte piézométrique du Néocomien à l'échelle du Bassin parisien et toit de la formation (Seguin <i>et al.</i> , 2015 ; Vernoux <i>et al.</i> , 1997).	27
Figure 11 : Cartes des principales caractéristiques du Néocomien du Bassin de Paris (toit, mur, température et transmissivité) (Seguin <i>et al.</i> , 2015).	28
Figure 12 : Carte d'épaisseur des sables du Néocomien (Seguin <i>et al.</i> , 2015).	29
Figure 13 : Localisation des doublets géothermiques exploitant les aquifères de l'Albien et du Néocomien.	31
Figure 14 : Localisation des forages B16 (Tour Crystal) et B20 (Tour Mirabeau) du doublet géothermique des Tours AGF (Paris, 15 ^{ème}).	32
Figure 15 : Coupe technique du forage B16 d'après Gaudriot.	34
Figure 16 : Coupe technique du forage B20 d'après Gaudriot. À noter que le calibre du massif de graviers est de 2,5 à 5 mm (erreur sur la coupe ci-dessus).	35
Figure 17 : Évolution des débits d'exploitation des puits B16 et B20 des Tours AGF de 2009 à 2016.	40
Figure 18 : Évolution de l'injectivité des ouvrages suivant le sens de circulation (B16 vers B20, puis B20 vers B16) de 2009 à 2016.	41
Figure 19 : Mesures de pressions d'injection sur le puits B16 (essai d'injection février 2017) d'après CFG Services.	42
Figure 20 : Localisation du forage producteur ILM1 et du forage injecteur ILM2 du doublet géothermique d'Issy-les-Moulineaux (92).	44
Figure 21 : Coupe technique de la complétion du forage de production ILM1 (d'après DOE).	47
Figure 22 : Coupe technique de la complétion du forage d'injection ILM2 (d'après DOE).	48
Figure 23 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (ILM1) et d'injection (ILM2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet d'Issy-les-Moulineaux, entre 2011 et 2013 (étiquette des données : débit en m ³ /h).	53
Figure 24 : Évolution de la turbidité des eaux produites lors du nettoyage des puits ILM1 et ILM2 du doublet d'Issy-les-Moulineaux, en avril 2014.	54

Figure 25 : Localisation du forage producteur LPR1 et du forage injecteur LPR2 du doublet géothermique du Plessis-Robinson (92).....	60
Figure 26 : Coupe géologique et technique du forage de production LRP1 (d'après DOE).....	62
Figure 27 : Coupe géologique et technique du forage d'injection LRP2 (d'après DOE).....	63
Figure 28 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (LPR1) et d'injection (LPR2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet du Plessis-Robinson, en 2012 (étiquette des données : débit en m ³ /h).....	65
Figure 29 : Localisation des forages de production ZCB P1 et d'injection ZCB P2 du doublet géothermique de la ZAC Clichy-Batignolles (75).....	73
Figure 30 : Coupe géologique et technique du forage de production ZCB P1 (d'après DOE).....	75
Figure 31 : Coupe géologique et technique du forage d'injection ZCB P2 (d'après DOE).....	76
Figure 32 : Évolution de l'indice d'injectivité (débit spécifique) du puits d'injection ZCB P2 et du débit d'exploitation du doublet de Clichy-Batignolles, entre mars 2017 et avril 2018 (d'après ANTEA).....	81
Figure 33 : Localisation des forages GMOU1 et GMOU2 (vert) du doublet géothermique de la Zac du Moulon et des forages GEP1 et GEP2 (orange) du doublet géothermique de la ZAC Polytechnique (91).....	85
Figure 34 : Coupe géologique du puits producteur GMOU1 du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91) d'après DOE.....	86
Figure 35 : Coupe géologique du puits injecteur GMOU2 du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91) d'après DOE.....	87
Figure 36 : Coupe géologique du puits producteur GEP1 du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91) d'après DOE.....	91
Figure 37 : Coupe géologique du puits injecteur GEP2 du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91) d'après DOE.....	92
Figure 38 : Crépine pré-gravillonnée en acier inoxydable Johnson Muni-Pack (gauche) et crépine en acier inoxydable 304 et 316 L à fil enroulé (droite) (source : JOHNSON).....	108
Figure 39 : Illustration de l'effet d'un développement complet du puits sur la formation au niveau du proche puits (source : présentation des crépines pré-gravillonnées de type Johnson).....	112
Figure 40 : Principe de fonctionnement du dispositif de rétro-lavage (Burté, 2019).....	117
Figure 41 : Principe de fonctionnement des filtres microfibrilles AMIAD AMF (d'après AMIAD).....	120

Liste des tableaux

Tableau 1 : Conception des forages du doublet des Tours AGF (Paris 75015).....	37
Tableau 2 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet des Tours AGF (Paris 75015).....	37
Tableau 3 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet des Tours AGF.....	43
Tableau 4 : Conception des forages du doublet d'Issy-les-Moulineaux (92).....	50
Tableau 5 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet d'Issy-les-Moulineaux (92).....	50
Tableau 6 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (ILM1) et d'injection (ILM2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet d'Issy-les-Moulineaux, entre 2011 et 2013.....	52
Tableau 7 : Résultats de la filtration étagée des échantillons prélevés au puits producteur ILM1.....	55
Tableau 8 : Évolution de la contribution des intervalles entre 2012 (en production) et 2019 (en injection) lors des flowmétries réalisées dans le forage injecteur ILM2.....	56

Tableau 9 : Évolution de la turbidité (valeurs NTU) en fonction du débit lors de la mise en production, par air-lift, du forage injecteur ILM2.	57
Tableau 10 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet d'Issy-les-Moulineaux.	59
Tableau 11 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (LPR1) et d'injection (LPR2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet du Plessis-Robinson, en 2012.	65
Tableau 12 : Conception des forages du doublet du Plessis-Robinson (92).	66
Tableau 13 : Caractérisation initiale du Néocomien au droit du doublet du Plessis-Robinson (92).	66
Tableau 14 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet du Plessis-Robinson.	72
Tableau 15 : Évolution des indices de productivité et d'injectivité des puits de production (ZCB P1) et d'injection (ZCB P2) du doublet de Clichy-Batignolles relevés au cours des essais, entre 2014 et 2016.	78
Tableau 16 : Conception des forages du doublet de Clichy-Batignolles (75).	80
Tableau 17 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de Clichy-Batignolles (75).	80
Tableau 18 : Rappel des indices de productivité et d'injectivité initiaux (2014/2016) du doublet de Clichy-Batignolles et évolution des paramètres enregistrés au cours de l'opération de rétro-lavage du puits injecteur ZCB P2 en 2018.	82
Tableau 19 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet de Clichy-Batignolles.	83
Tableau 20 : Synthèse des indices de productivité obtenus suite au développement et aux essais de pompages sur les forages GMOU1 et GMOU2.	88
Tableau 21 : Conception des forages du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91).	89
Tableau 22 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91).	89
Tableau 23 : Synthèse des indices de productivité obtenus suite au développement et aux essais de pompages sur les forages GEP1 et GEP2.	94
Tableau 24 : Conception des forages du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91).	95
Tableau 25 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91).	95
Tableau 26 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour la conception et la réalisation des travaux de forages des opérations à l'Albien et au Néocomien.	109
Tableau 27 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour la caractérisation du réservoir, le développement des puits et les essais de pompage des opérations à l'Albien et au Néocomien.	114
Tableau 28 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour l'exploitation des opérations à l'Albien et au Néocomien.	121

Liste des annexes

Annexe 1. Comptes-rendus (lien pdf) des deux réunions d'échanges menées dans le cadre du projet AFIA	127
Annexe 2. Tableau de synthèse des informations recueillies par opération à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris	131

1. Présentation du projet AFIA

1.1. CONTEXTE ET ENJEUX

L'exploitation des réservoirs sableux de l'Albien et du Néocomien, dans le Bassin de Paris (cinq doublets à l'Albien et un doublet au Néocomien), est actuellement confrontée à de sérieux problèmes de dysfonctionnement des installations, liés aux phénomènes de colmatage, au niveau des puits d'injection.

Ces formations clastiques sont réputées délicates en termes d'exploitation et surtout d'injection, compte-tenu de leur nature sableuse et de l'hétérogénéité des lithologies rencontrées. Plusieurs projets sont actuellement à l'étude sur d'autres réservoirs sableux, en France, et notamment au niveau du Bassin Aquitain. Il est donc important d'apporter des réponses aux problématiques rencontrées sur ce type d'aquifère.

1.2. OBJECTIF DU PROJET

L'objectif de ce projet, réalisé dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM 2019 n° 1805C0054, est d'appuyer la filière pour répondre efficacement aux problématiques de colmatage des puits d'injection rencontrées par les exploitations géothermiques en doublet de l'Albien et du Néocomien, dans le Bassin de Paris.

Afin de comprendre les phénomènes en jeu et envisager des solutions, il a été proposé de poursuivre les discussions et échanges techniques sur le sujet initié dans le cadre du Comité Technique Géothermie sur Aquifères Profonds (CT-GAP), en 2018. Les différents opérateurs (bureaux d'études et exploitants), le BRGM et l'ADEME ont pu ainsi se réunir pour définir un plan d'action, développer des pistes de réflexion et définir les priorités pour la poursuite des développements des aquifères sableux.

Au travers de ces échanges, il était proposé de réaliser, dans le cadre de ce projet, un retour d'expérience des exploitations, à l'Albien et au Néocomien, et dans d'autres pays européens. Il s'agissait ainsi d'identifier les problématiques spécifiques rencontrées pour ces réservoirs, les caractéristiques des ouvrages, les monitorings et tests réalisés et autres informations pertinentes sur le sujet. Cette étude a donc, été réalisée en étroite collaboration avec les opérateurs. Les données récoltées sont, notamment, les données d'exploitation (pressions, débits), les données d'essais de production, d'essais par paliers de débits et les données géochimiques.

Enfin, une réflexion a été engagée pour identifier des solutions technico-économiques adaptées, préventives ou curatives, et travailler à la réalisation d'un guide de bonnes pratiques dans la continuité du projet GUIDOCLAST (Bugarel *et al.*, 2018, 2016).

1.3. TÂCHES DU PROJET

Les tâches à réaliser, dans le cadre de ce projet, étaient les suivantes :

1. animation du comité technique entre les bureaux d'études et opérateurs du secteur de la géothermie sur les problématiques d'injectivité et de colmatage des puits d'injection.

Deux réunions ont pu être effectivement réalisées, en décembre 2018 et décembre 2019, compte-tenu de la disponibilité de l'ensemble des intervenants sollicités. Des échanges téléphoniques avec chaque opérateur ont également été réalisés pour faciliter les discussions ;

2. retour d'expérience des exploitations de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris et des opérations ciblant des formations sableuses en Europe ;
3. réflexion sur les phénomènes en jeu dans les processus de colmatage des puits d'injection dans les formations sableuses de l'Albien-Néocomien. Établir des recommandations sur les solutions (préventives ou curatives) pouvant être mises en place.

1.4. LIVRABLES DU PROJET

Les comptes rendus des deux réunions d'échanges sont reportés en Annexe 1 de ce rapport, qui constitue le livrable principal du projet AFIA.

2. État des connaissances relatives aux aquifères de l'Albien et du Néocomien

2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE CES AQUIFÈRES STRATÉGIQUES ET DES CONTRAINTES D'USAGE POUR LA GÉOTHERMIE

Les aquifères de l'Albien et du Néocomien couvrent près des deux tiers de l'extension du Bassin de Paris (Figure 1 et Figure 2). Leur profondeur augmente, depuis les zones d'affleurement (en périphérie du bassin) jusqu'au centre du bassin (à l'est de Paris), où les profondeurs maximales de l'Albien et du Néocomien sont respectivement de l'ordre de 800 et 1 000 m.

Au droit des opérations de géothermie profonde ayant ciblé l'Albien (5), dans un secteur très proche de Paris, le toit de l'aquifère varie fortement de 480 à 680 m de profondeur. Le toit du Néocomien se situe à une profondeur proche de 880 m, au droit de l'opération du Plessis-Robinson.

Ces aquifères sont protégés des pollutions de surface grâce à leur profondeur importante. Ces nappes d'eau souterraine d'excellente qualité représentent une réserve stratégique d'eau potable à l'échelle de la région Île-de-France et du Bassin Seine-Normandie. Ces nappes sont considérées, d'après le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du Bassin Seine-Normandie (SDAGE), comme une ressource ultime pour l'alimentation en eau potable, en cas de crise majeure.

Elles sont alimentées par l'infiltration des eaux météoriques, au droit des zones d'affleurement qui se trouvent, principalement, à l'est et au sud-est du Bassin parisien, mais aussi au nord, au niveau de la faille de Bray.

L'exploitation de la nappe de l'Albien, à partir de 1841, a fait chuter le niveau piézométrique d'une centaine de mètres en un siècle, au droit de la région parisienne. L'exploitation pour l'eau potable a donc été très fortement limitée. Elle est actuellement contrôlée pour préserver la ressource en quantité suffisante, en cas de crise. Les autorisations de prélèvements sont ainsi gérées par la DRIEE, qui assure la police de l'eau sur la nappe de l'Albien.

Les forages géothermiques, dans ces aquifères, sont autorisés avec une restitution des eaux produites par réinjection dans la nappe. Cependant, en cas d'ultime secours et à la demande des services de l'État, l'eau puisée pourra être distribuée pour des besoins d'alimentation en eau potable (AEP). Il est donc requis, pour ces forages, de prévoir un raccordement à un réseau de distribution situé à proximité, ou bien de prévoir l'approvisionnement par camion-citerne. Ce dispositif permet alors de réduire les coûts d'investissement pour les forages géothermiques, puisque le Syndicat des eaux d'Île-de-France prévoit une aide financière à la création de nouveaux forages, qui pourront ainsi être utilisés comme ouvrages AEP, en cas de besoin.

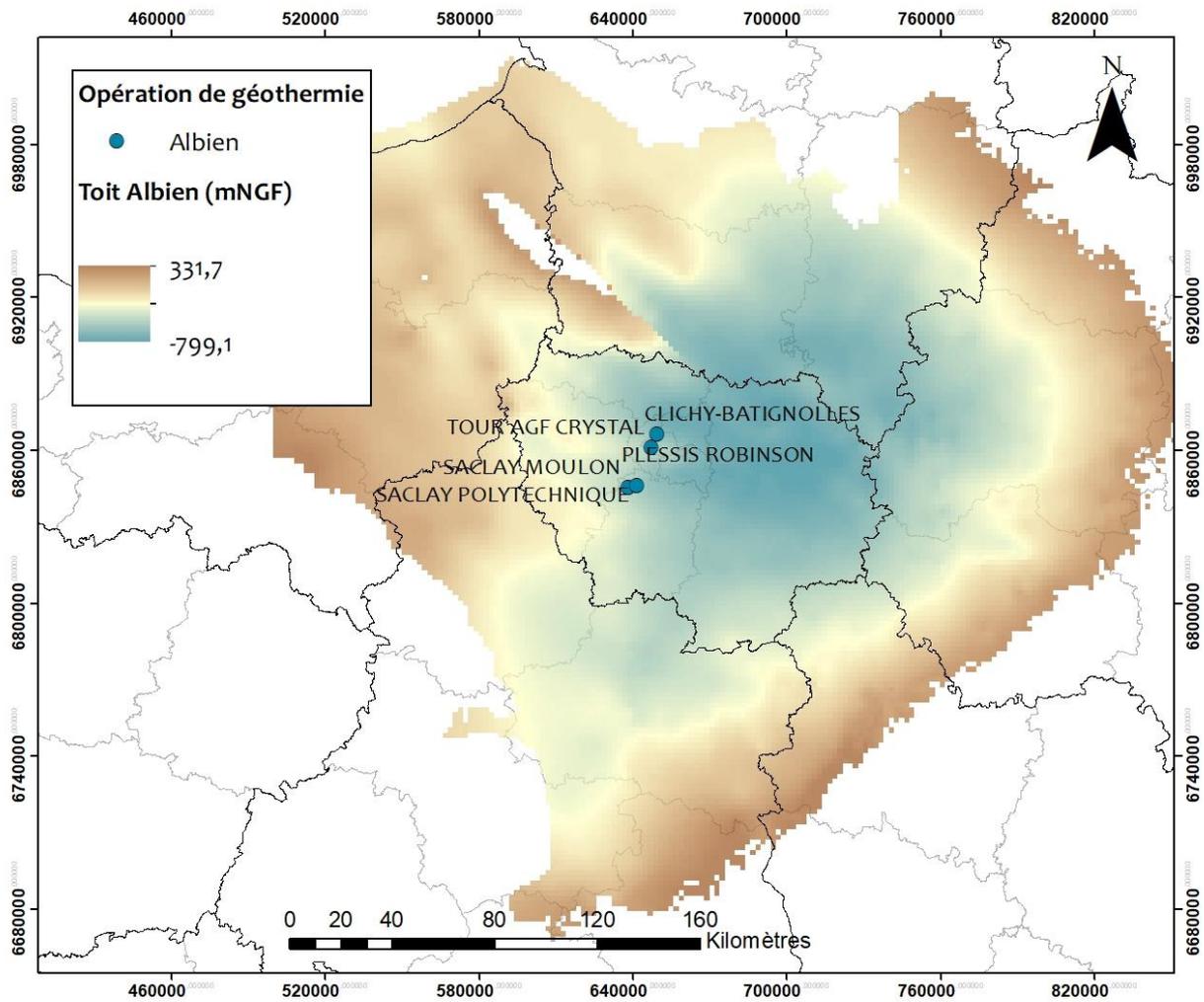


Figure 1 : Extension et profondeur (en mètres NGF) du toit de l'aquifère de l'Albien (Seguin et al., 2015) et localisation des opérations de géothermie profonde.

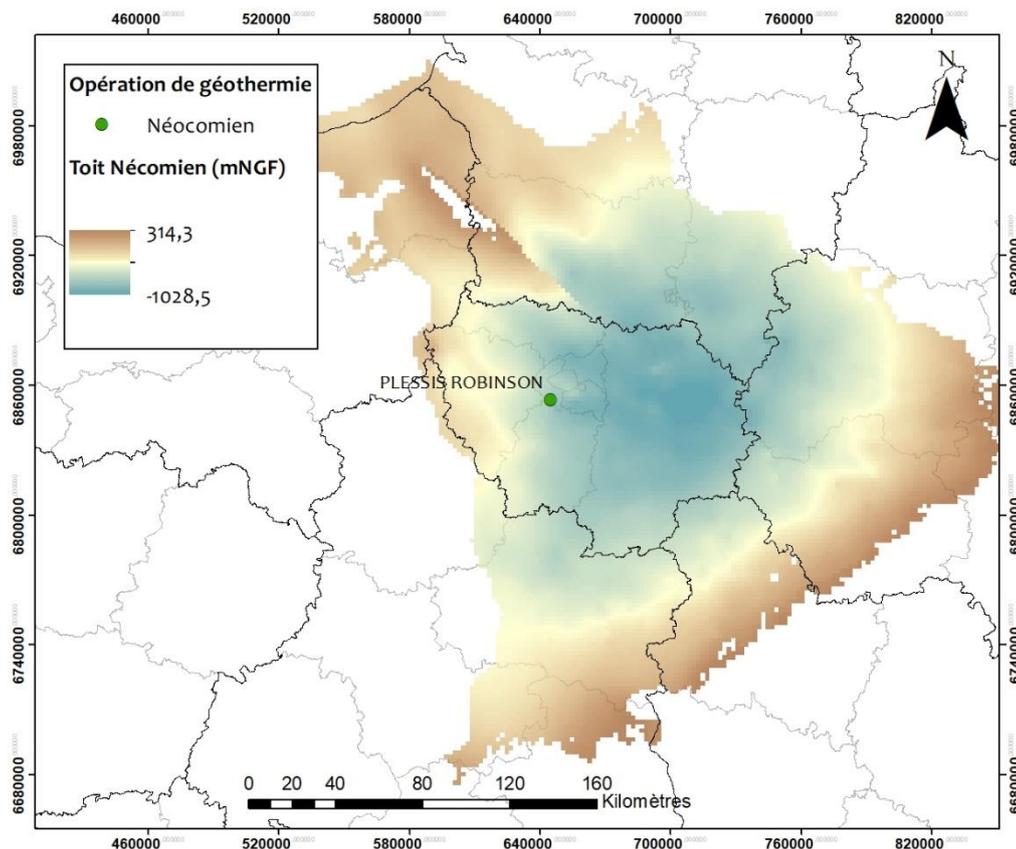


Figure 2 : Extension et profondeur (en mètres NGF) du toit de l'aquifère du Néocomien (Seguin et al., 2015) et localisation des opérations de géothermie profonde.

Compte-tenu de la sensibilité des nappes, des mesures préventives spécifiques sont prises, lors de la phase de travaux d'un nouveau doublet de géothermie ciblant ces aquifères, afin de limiter les risques de pollution, lors du forage et de la construction de la centrale géothermique :

- la mise en place d'un double tubage sur les 200 premiers mètres, afin d'éviter la contamination de la nappe ciblée par des aquifères superficiels ;
- le contrôle de la qualité des cimentations des tubages ;
- la désinfection des outils de forage et de tous les organes en contact avec l'eau de l'aquifère cible ;
- la protection de la tête de forage dans une cave enterrée, avec un accès réservé au personnel de maintenance, afin de limiter les intrusions humaines, et permettant d'assurer son étanchéité pour limiter les infiltrations d'eau superficielle ;
- le maintien sous pression du réseau primaire dans lequel circule l'eau de l'aquifère cible, afin d'assurer le confinement des eaux et détecter toute fuite ;
- la surveillance réglementaire des installations de la boucle primaire, qui intègre le suivi régulier de la qualité des eaux et des paramètres d'exploitation (compte rendu annuel d'exploitation et des inspections périodiques à l'attention de la DRIEE).

2.2. CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE DE L'ALBIEN ET DU NÉOCOMIEN

Des descriptions détaillées de la géologie et de l'hydrogéologie des aquifères de l'Albien et du Néocomien sont proposées par (Mégnyen *et al.*, 1980 ; Raoult, 1999 ; Vernoux *et al.*, 1997).

Les aquifères de l'Albien et du Néocomien appartiennent aux formations du Crétacé inférieur du Bassin de Paris (Figure 3 - encadré rouge), qui sont constituées par des bancs de sables, plus ou moins continus, séparés par des niveaux argileux.

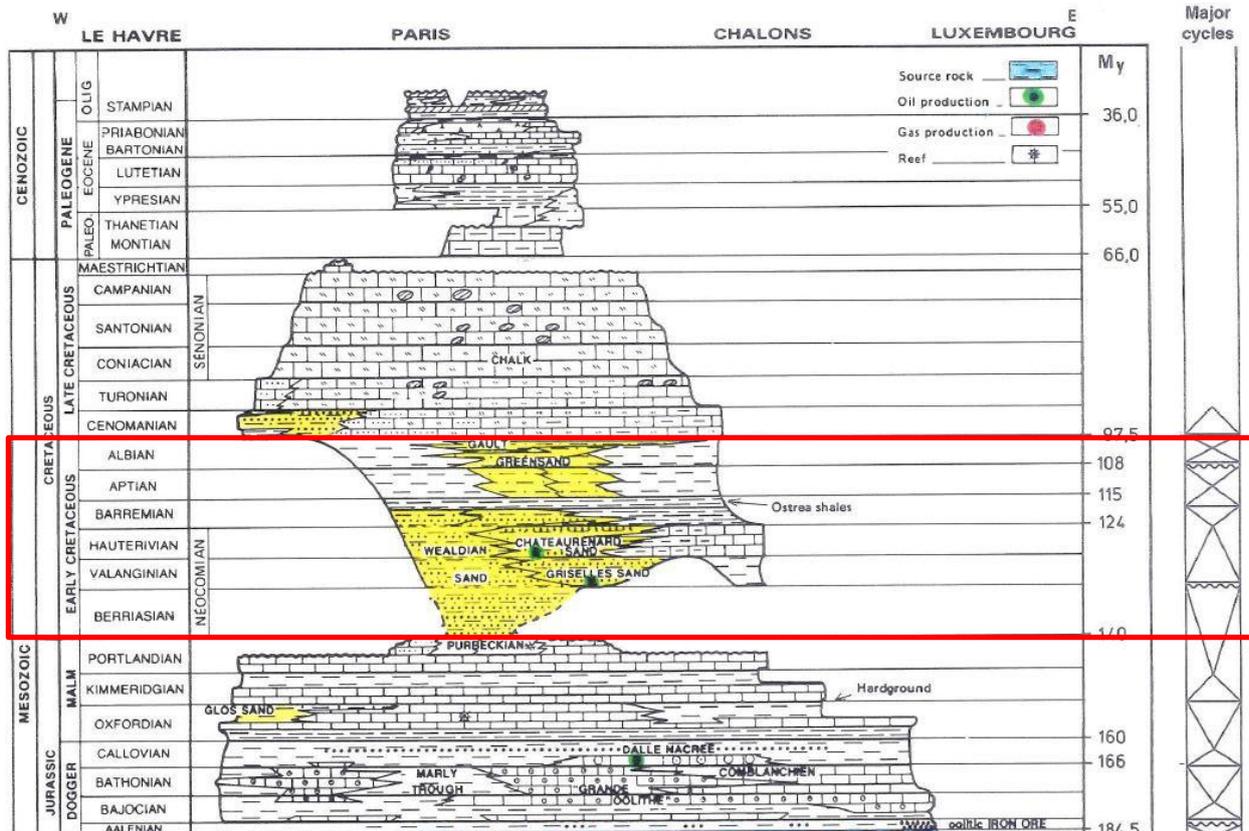


Figure 3 : Lithostratigraphie du Bassin parisien (Perrodon *et al.*, 1990).

L'Albien est situé au toit de la pile sédimentaire du Crétacé inférieur. L'ensemble de l'Albien est épais d'environ 130 m.

Les dépôts de l'Albien peuvent être subdivisés de haut en bas de la façon suivante (Mégnyen *et al.*, 1980) :

- marnes de Brienne ;
- argile du Gault ;
- sables de Frécambault ;
- argiles Tégulines ;
- sables des Drillons ;
- argiles de l'Armanche ;
- sables verts.

La principale zone aquifère correspond à la partie moyenne et inférieure de l'Albien. Elle comprend trois horizons sableux, qui sont les sables de Frécambault (sables moyens à grossiers, jaune-vert, glauconieux), les sables de Drillons (sables moyens à grossiers, peu épais, dépôts deltaïques) et les sables verts (sables à fraction argileuse). Ces trois formations sableuses peuvent se diviser en plusieurs bancs, ou bien n'en former qu'un seul suivant la localisation. On considère, généralement, que ces trois niveaux forment une continuité hydraulique et constituent ainsi un seul et même réservoir.

On retrouve, entre l'Albien et le Néocomien, les formations argilo-sableuses de l'Aptien, moins perméables, mais n'isolant pas complètement les deux aquifères. L'Aptien est difficilement repérable dans les forages profonds ; il est souvent confondu avec les premiers niveaux de l'Albien.

Le Néocomien correspond à la partie basale du Crétacé inférieur non différenciée. De haut en bas, il comprend les étages géologiques du Barrémien inférieur, de l'Hauterivien et du Valanginien.

Les dépôts du Néocomien peuvent être subdivisés (Mégnyen *et al.*, 1980) selon des faciès différents suivant les secteurs. La coupe schématique ci-dessous (Figure 4) permet de les identifier.

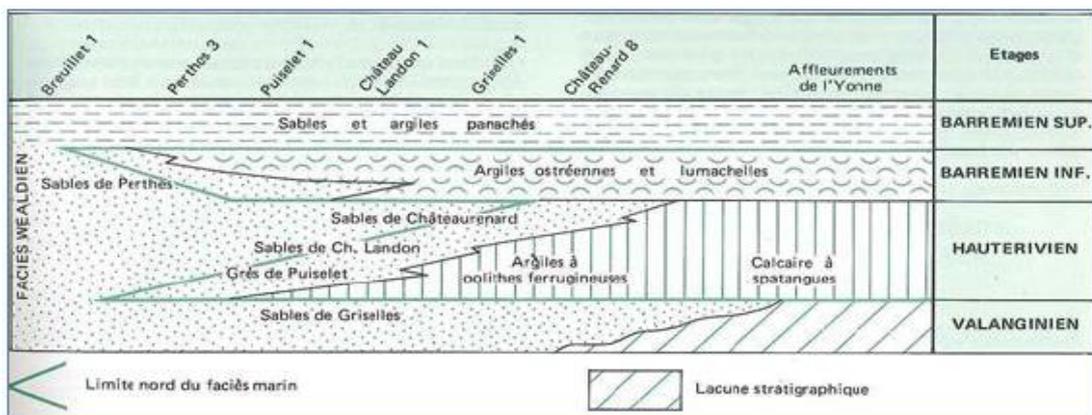


Figure 4 : Coupe schématique des passages de faciès du Valanginien, Hauterivien et Barrémien, depuis l'affleurement de l'Yonne jusqu'au centre du Bassin de Paris (Mégnyen *et al.*, 1980).

Ainsi, dans le Bassin de Paris, le Crétacé inférieur débute par des faciès continentaux dits faciès Wealdien, constitués d'une alternance de sables, grès et argiles sableuses avec passées de lignite, comprenant un aquifère multicouche, d'épaisseur variable entre 20 et 90 m. La perméabilité du faciès est assez bonne dans les parties sableuses, mais les couches sont assez discontinues.

Il se poursuit, ensuite, avec des faciès marins sur le pourtour oriental (marnes, calcaires marneux, calcaires coquilliers), avec des perméabilités assez faibles et pouvant atteindre, par endroit, une centaine de mètres d'épaisseurs. Cette série carbonatée est située dans le quart sud-est du bassin.

Au centre du Bassin de Paris, le Néocomien présente une épaisseur d'environ 120 m. Il est constitué d'une alternance de sable très fin et d'argile (d'après les observations faites au niveau des forages du Plessis-Robinson).

Les niveaux sableux du Néocomien sont, généralement, plus réguliers que ceux de l'Albien. Au centre du bassin (partie gauche de la Figure 4), les sables de Châteaurenard, les sables de Château-Landon sont jointifs, parfois également avec les grès du Puiset, et forment ainsi les sables de l'Hauterivien. On retrouve, sous ces sables, le Wealdien, constitué de sables blancs, marnes et grès ferrugineux du Valanginien et des sables de Griselles, dépôts grossièrement détritiques. Ces sables sont homogènes avec un faible pourcentage d'argile.

2.3. CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DE L'ALBIEN ET DU NÉOCOMIEN

Les études hydrogéologiques montrent que les aquifères de l'Albien et du Néocomien sont plus ou moins individualisés, selon les secteurs du Bassin parisien (Mégny *et al.*, 1980 ; Raoult, 1999 ; Vernoux *et al.*, 1997).

Les aquifères de l'Albien et du Néocomien, séparés par les formations argilo-sableuses de l'Aptien, sont globalement en communication hydraulique à l'échelle du bassin, d'où le terme d'aquifère multicouches de l'Albien-Néocomien. Ce système aquifère est principalement captif, ce qui signifie que le niveau de la nappe d'eau souterraine se trouve à une cote piézométrique supérieure à la profondeur du toit de l'aquifère.

Les formations du Crétacé inférieur sont regroupées selon plusieurs entités hydrogéologiques dans le référentiel BD LISA, qui sont, de haut en bas :

- les argiles du Gault, marnes et gaizes du Cénomaniens inférieur à moyen et de l'Albien supérieur du Bassin parisien (entité BDLISA 125AA) ;
- les sables verts de l'Aptien-Albien du Bassin parisien (entité 127AA) ;
- les argiles de l'Aptien-Barrémien du Bassin parisien (entité 127AC) ;
- les sables, grès et calcaires du Crétacé inférieur (Néocomien) dans les bassins Seine-Normandie majoritairement, nord Loire-Bretagne et sud Artois-Picardie (entité 127AG).

La Figure 5 présente l'extension de ces entités hydrogéologiques au sein du Bassin parisien.

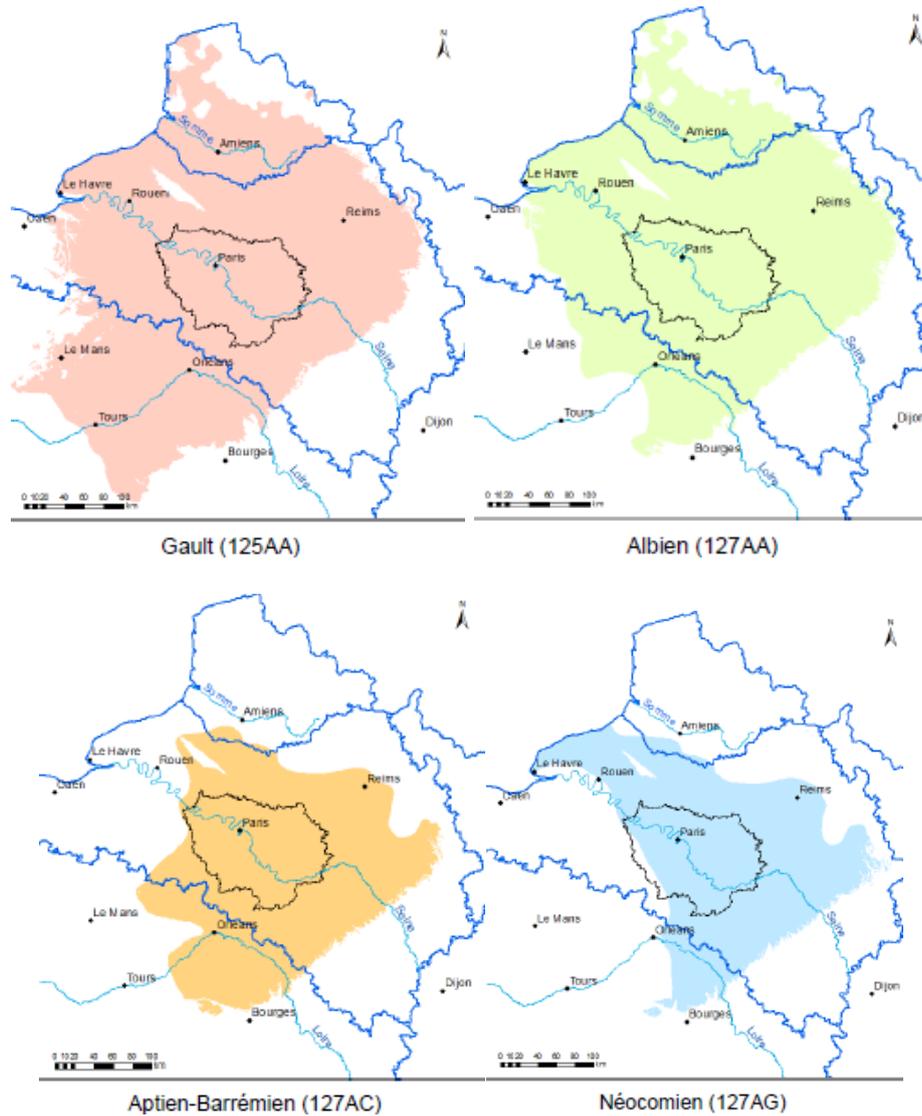


Figure 5 : Extension des entités hydrogéologiques du Gault, de l'Albien, de l'Aptien-Barrémien et du Néocomien (source : BD LISA).

L'aquifère de l'Albien est, de par son extension et ses réserves, l'aquifère le plus important du Crétacé inférieur, au niveau du Bassin de Paris. Il est constitué des sables verts, des sables des Drillons et des sables de Frécambault. L'Albien est isolé de l'aquifère sus-jacent de la craie par les argiles du Gault, et de celui du Néocomien sous-jacent, par des formations à alternances argileuses et gréseuses et par les formations argilo-sableuses de l'Aptien.

L'Albien est captif sur la majeure partie du Bassin de Paris et libre au niveau des affleurements, à l'est du bassin et au sud-est de l'anticlinal du Pays de Bray. Les faciès détritiques au centre du Bassin de Paris sont les zones de productivité les plus favorables de l'aquifère.

Une carte piézométrique a été réalisée en 1997 (Figure 6), à partir de 296 points de mesure, majoritairement des niveaux statiques sur forages d'eau, non synchrones (Vernoux *et al.*, 1997). Depuis 1841 et l'exploitation de l'Albien, d'importantes modifications de la piézométrie ont pu être identifiées, à cause de l'exploitation intensive en région parisienne, avec l'apparition d'un cône de dépression, au centre du bassin. Les écoulements souterrains convergent vers Paris, à partir des zones d'affleurements situées en bordures est et sud-est du bassin.

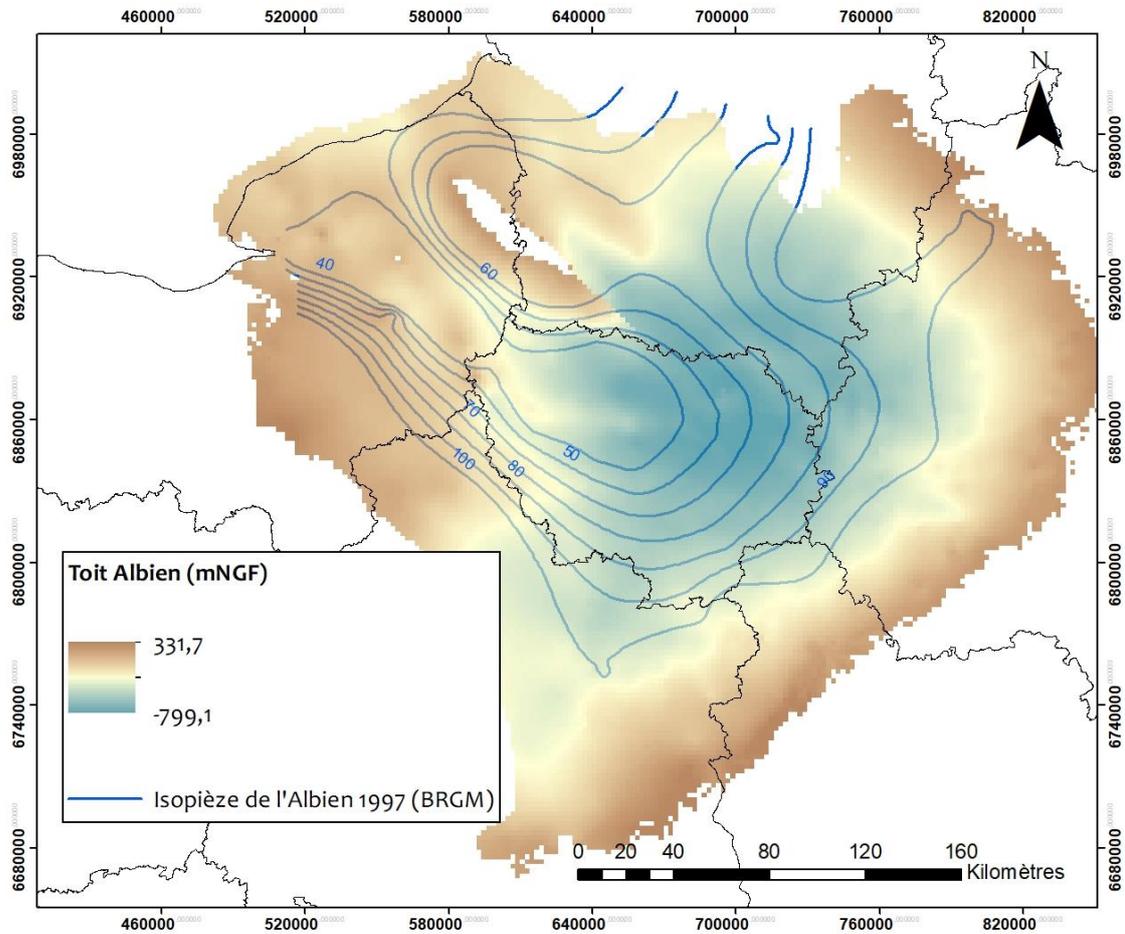


Figure 6 : Carte piézométrique de l'Albien à l'échelle du Bassin parisien (Seguin et al., 2015 ; Vernoux et al., 1997).

Des travaux récents ont permis de caractériser les dynamiques hydrauliques et thermiques de l'aquifère de l'Albien avec, notamment, la réalisation d'une carte piézométrique synchrone à l'échelle du Bassin de Paris, et la réalisation de thermométries (Dupaigne *et al.*, 2019). Les résultats sont présentés ci-dessous (Figure 7).

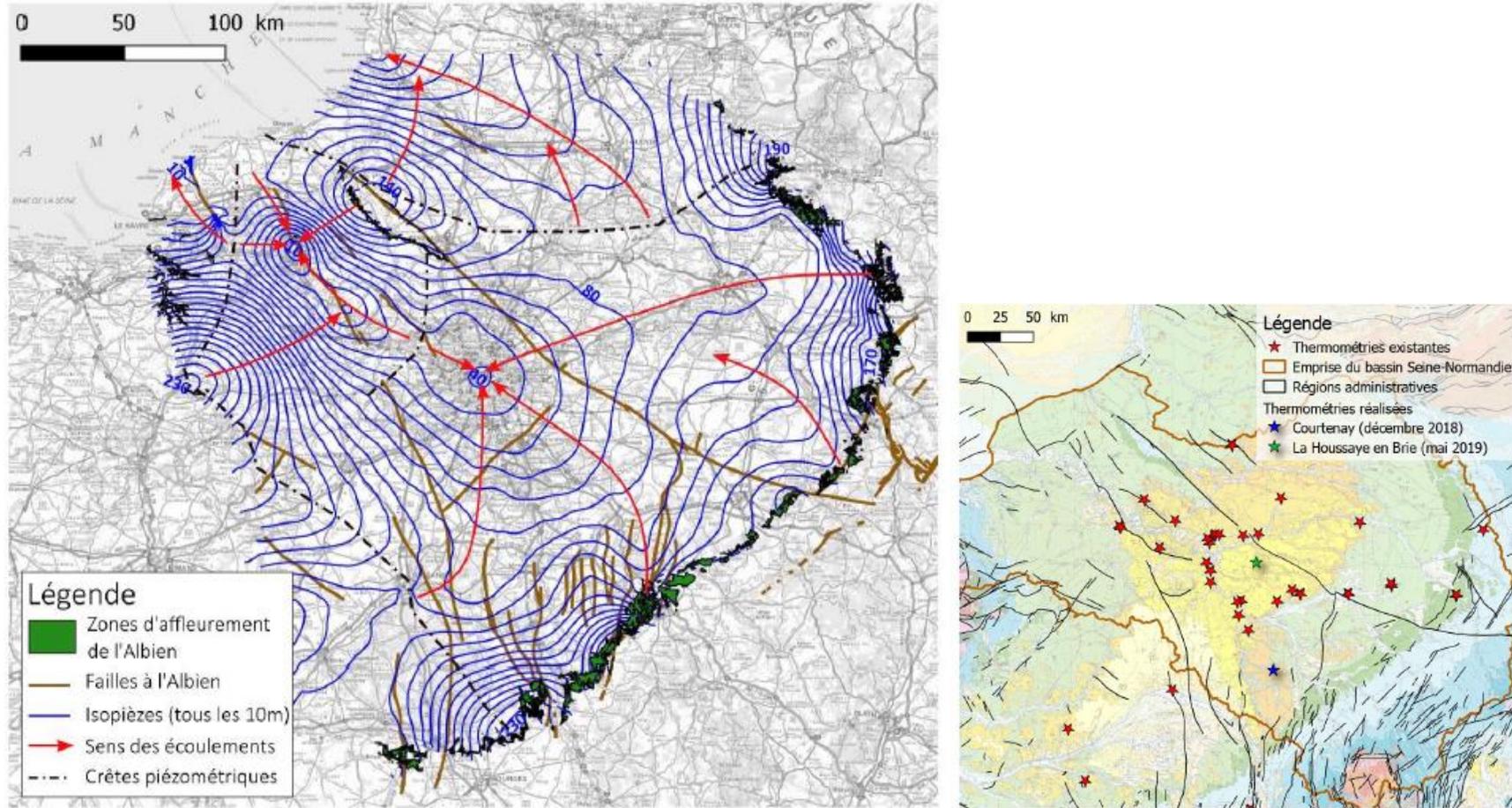


Figure 7 : Carte piézométrique de l'Albien et sens d'écoulement à gauche, et localisation des thermométries existantes et nouvelles à droite (Dupaigne et al., 2019).

Les cartes des principales caractéristiques de l'aquifère de l'Albien (toit, mur, température, transmissivité et épaisseur du réservoir) sont présentées en Figure 8 et Figure 9 (Seguin *et al.*, 2015). Au centre du bassin, les températures et les transmissivités sont parmi les plus importantes : elles atteignent, respectivement, 38 °C et 10^{-2} à 10^{-3} m².s⁻¹.

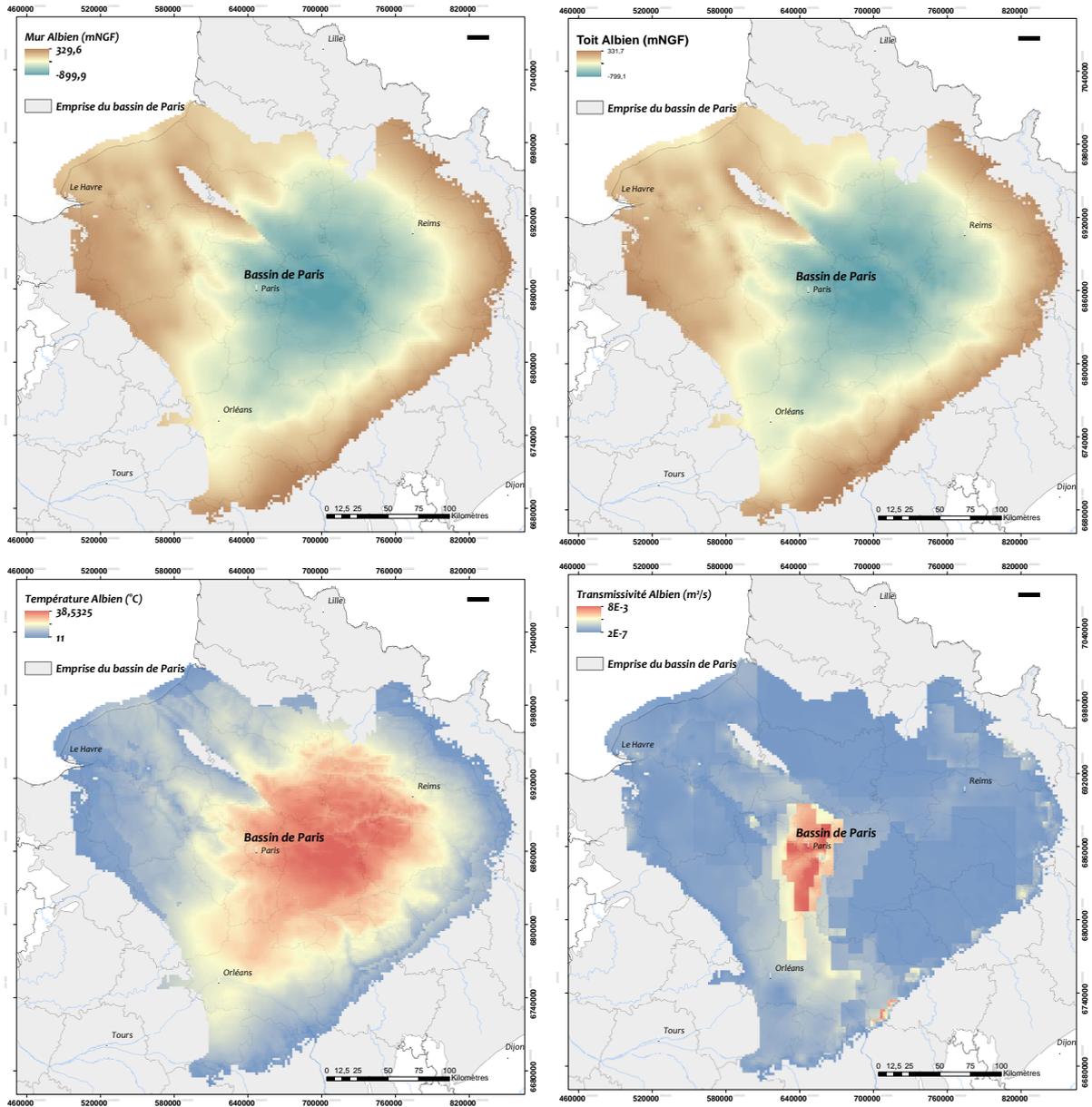


Figure 8 : Cartes des principales caractéristiques de l'Albien du Bassin de Paris (toit, mur, température et transmissivité) (Seguin *et al.*, 2015).

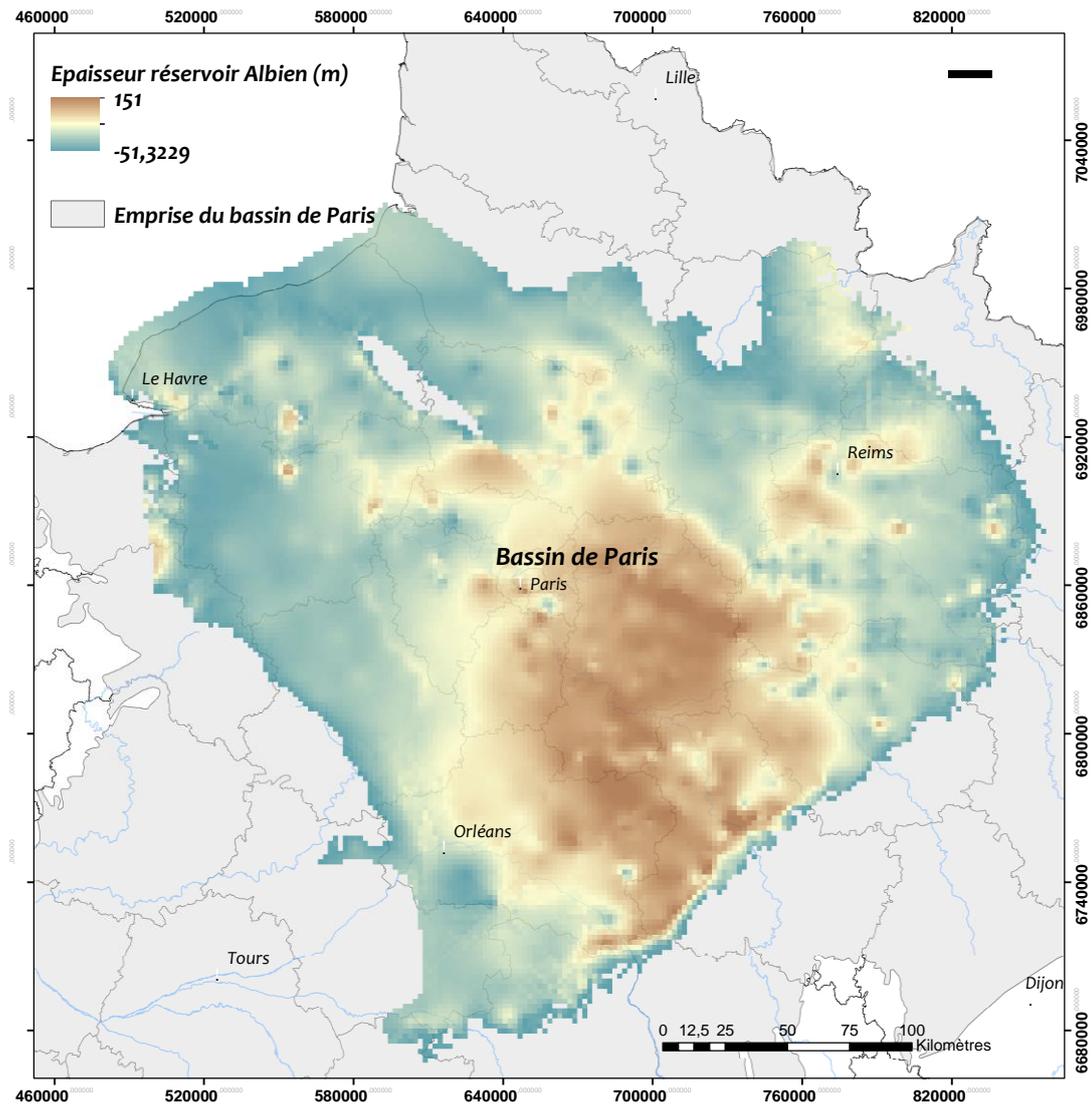


Figure 9 : Carte d'épaisseur du réservoir de l'Albien (Seguin et al., 2015)

L'aquifère du Néocomien est localement isolé des formations de l'Albien par les horizons argileux de l'Aptien et du Barrémien. Ces horizons sont épais de plusieurs dizaines de mètres, au centre du bassin, mais leur épaisseur diminue au sud-ouest et au nord du bassin.

La formation des sables du Néocomien est aquifère et la nappe est captive. Seules les formations calcaires de l'Hauterivien affleurent au sud-est et au nord du bassin (Figure 4).

La Figure 10 présente la carte piézométrique du Néocomien réalisée lors de la synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du Bassin de Paris (Vernoux et al., 1997) à partir de 76 points de mesure et des données non synchrones.

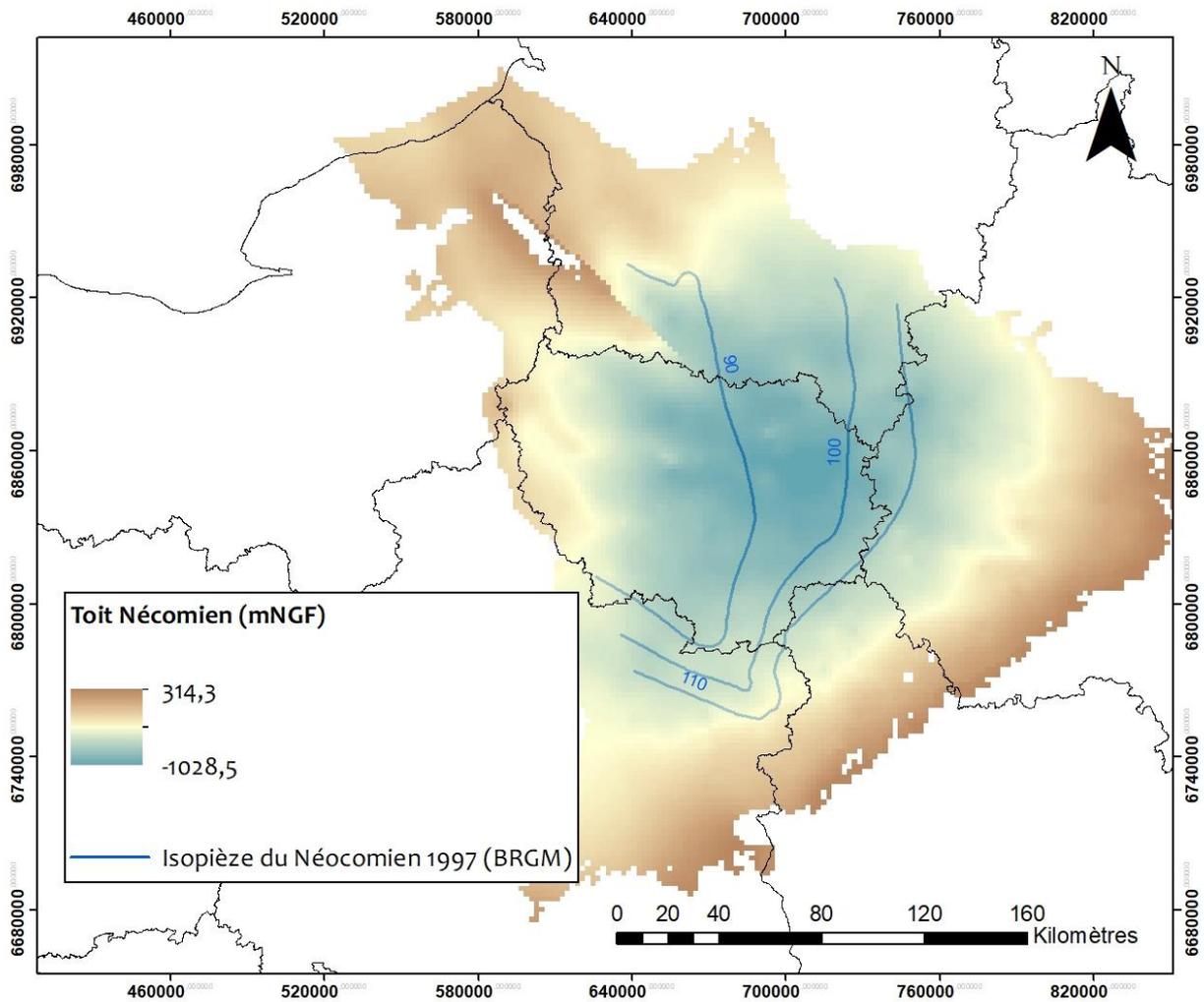


Figure 10 : Carte piézométrique du Néocomien à l'échelle du Bassin parisien et toit de la formation (Seguin et al., 2015 ; Vernoux et al., 1997).

Les écoulements souterrains convergent, comme pour l'aquifère de l'Albien, vers Paris. La mise en exploitation de l'Albien au XIX^e siècle a induit une baisse de la piézométrie dans le Néocomien d'environ 50 m en région parisienne (contre environ 100 m dans l'Albien). Les gradients hydrauliques, dans le Néocomien, sont plus faibles que ceux de l'Albien. Entre les affleurements et Paris, le gradient est d'environ 0,4 % (Vernoux *et al.*, 1997).

Les cartes des principales caractéristiques de l'aquifère du Néocomien (toit, mur, température, transmissivité et épaisseur de sable) sont présentées en Figure 11 et Figure 12.

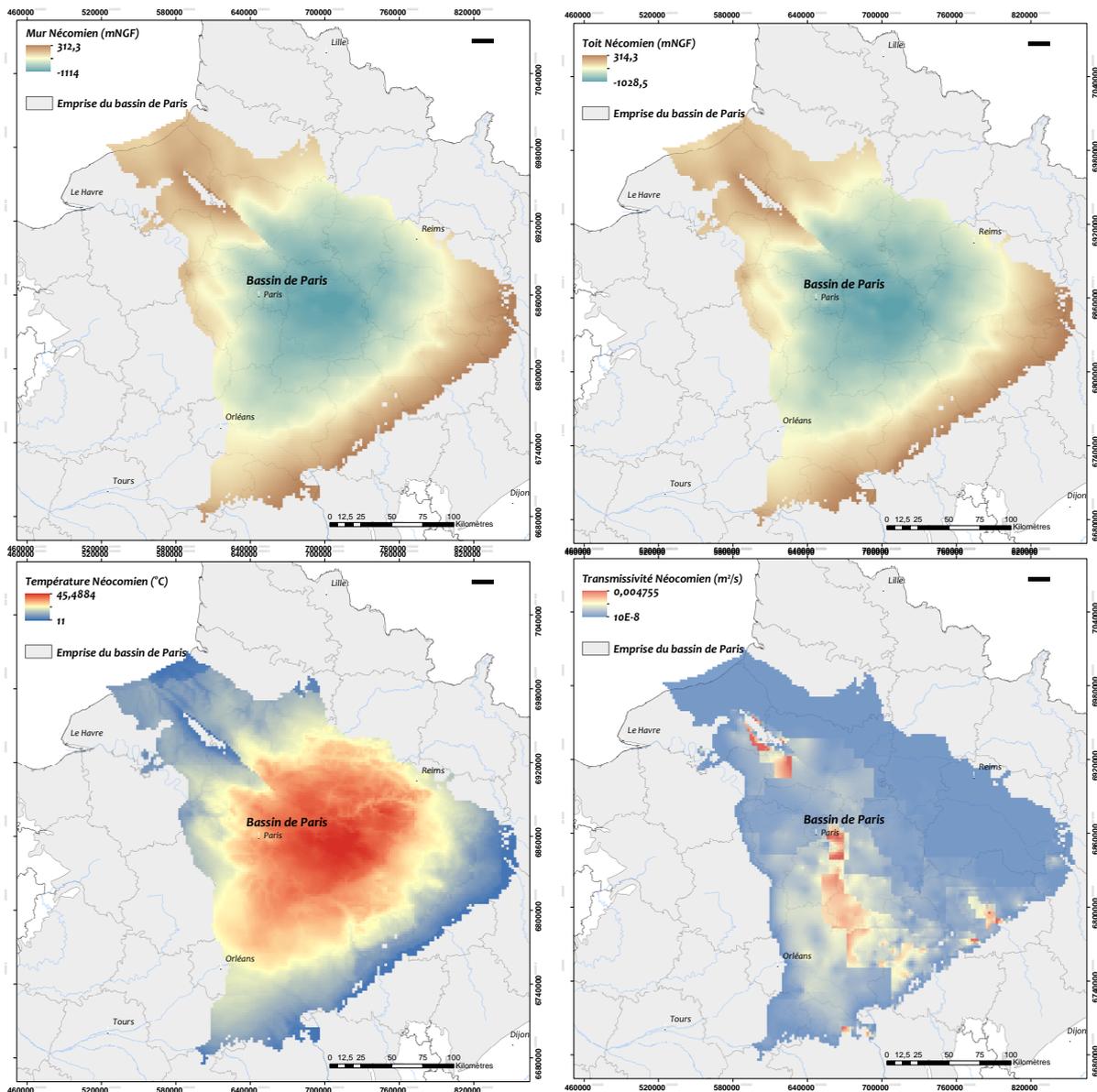


Figure 11 : Cartes des principales caractéristiques du Néocomien du Bassin de Paris (toit, mur, température et transmissivité) (Seguin et al., 2015).

Dans l'ensemble, la transmissivité du Néocomien est plus faible que celle de l'Albien (les valeurs sont inférieures à $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), à cause de la plus faible granulométrie des sables. Leur cimentation peut également être irrégulière et engendre une forte variabilité de la transmissivité.

Les températures au centre du bassin sont d'environ 45 °C.

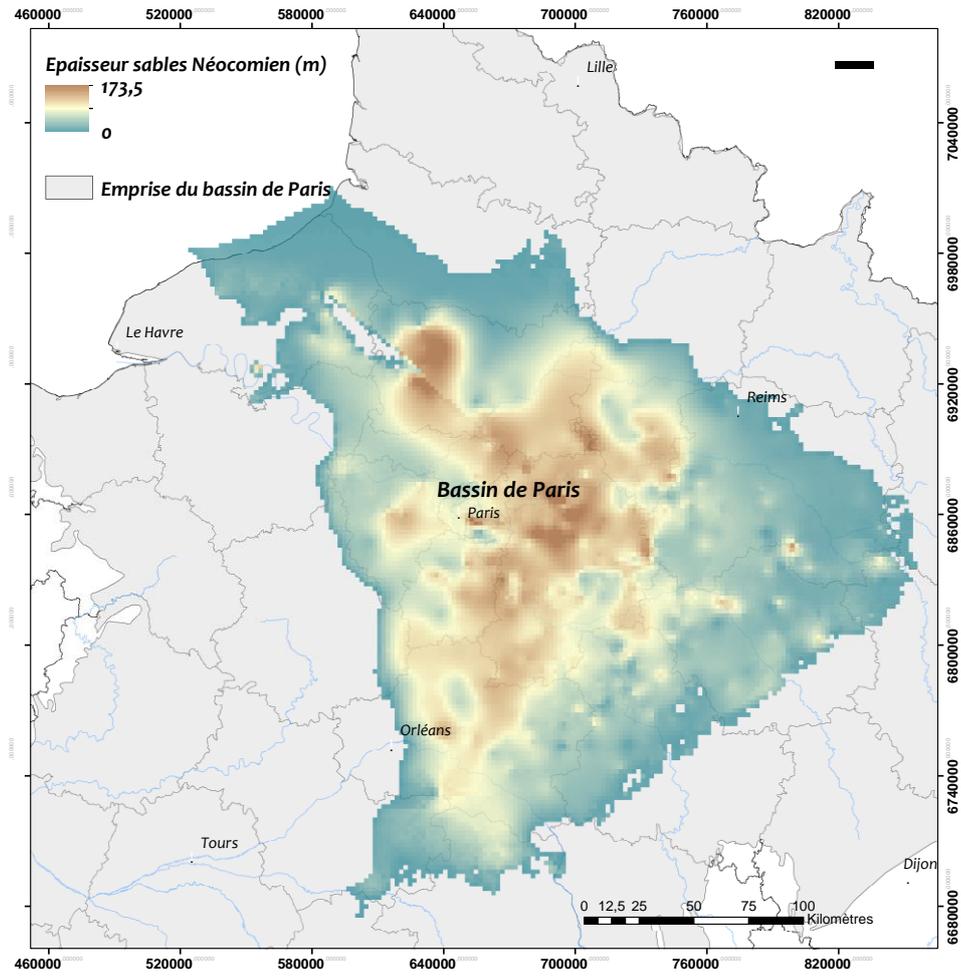


Figure 12 : Carte d'épaisseur des sables du Néocomien (Seguin et al., 2015).

3. Retour d'expérience des opérations de géothermie à l'Albien et Néocomien du Bassin de Paris

En 2019, cinq opérations de géothermie (doublets de forages) exploitent l'aquifère de l'Albien et un doublet capte l'aquifère du Néocomien (Figure 13), en région Ile-de-France. La plus ancienne opération (Tours AGF, Paris 15^{ème}) a été mise en service en 1990, et les opérations les plus récentes ont été mises en exploitation à la fin de l'année 2019 (deux doublets de Saclay (91) : ZAC Mouton et Polytechnique).

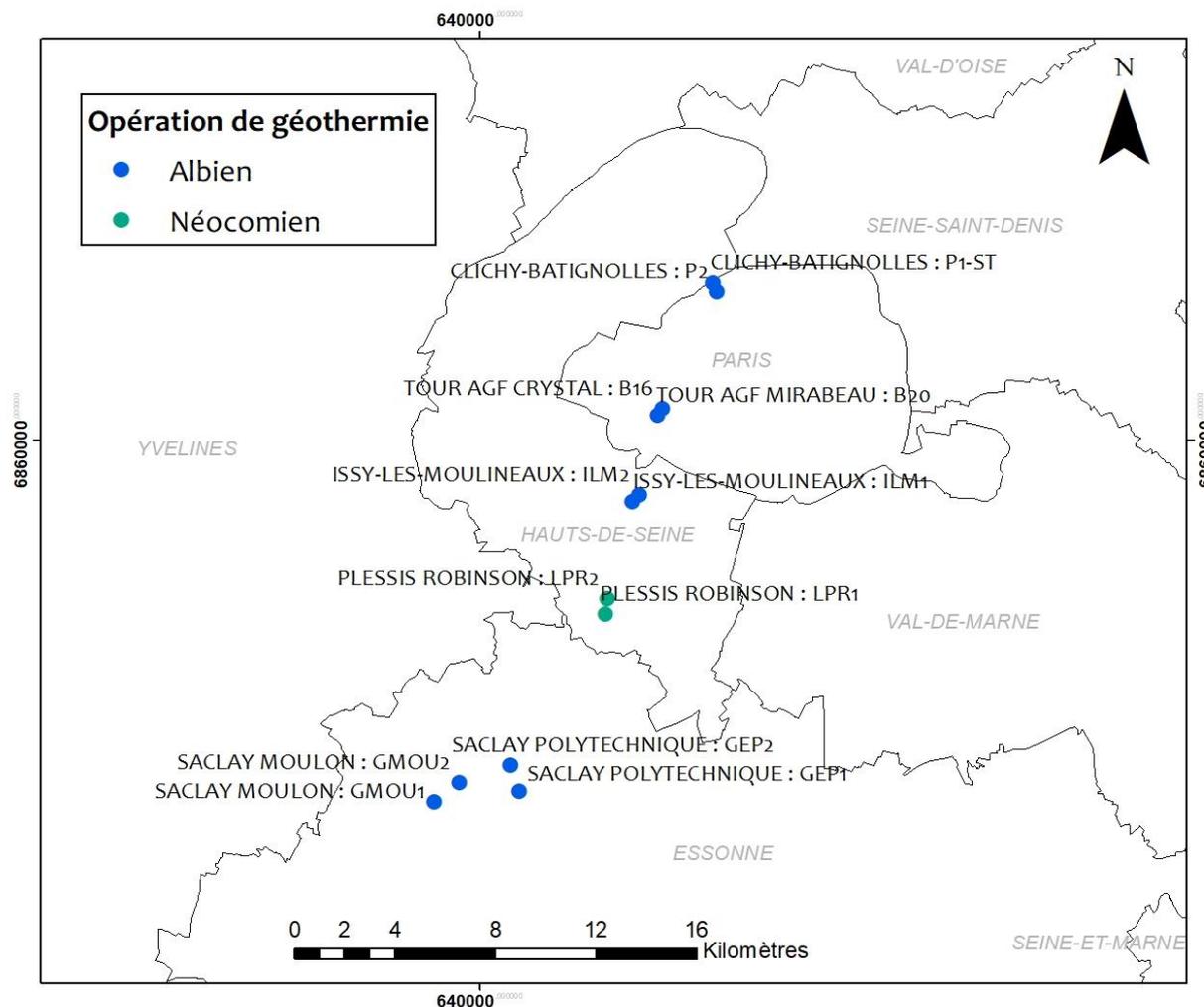


Figure 13 : Localisation des doublets géothermiques exploitant les aquifères de l'Albien et du Néocomien.

Les opérations sont décrites dans les paragraphes suivants, d'après l'analyse des rapports de fin de travaux et des documents fournis par les opérateurs. La synthèse des éléments est reportée en Annexe 2.

3.1. OPÉRATION DES TOURS AGF (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 1990

3.1.1. Contexte et problématique de l'opération

Parmi les six opérations ayant ciblé les aquifères sableux de l'Albien ou du Néocomien, l'opération des Tours AGF (tours Crystal et Mirabeau) est la plus ancienne. Localisée à Paris, dans le 15^{ème} arrondissement (Figure 14), cette opération compte **30 années d'exploitation**.



Figure 14 : Localisation des forages B16 (Tour Crystal) et B20 (Tour Mirabeau) du doublet géothermique des Tours AGF (Paris, 15^{ème}).

Ce doublet, à l'Albien, a été conçu pour permettre, grâce à l'utilisation d'une PAC, le rafraîchissement en été et le chauffage en hiver des bâtiments, avec un apport périodique par le réseau de chaleur géré par la CPCU.

Les forages ont la spécificité d'être réversibles (pouvant fonctionner en injection ou en production) **pour permettre la production de chaud ou de froid suivant les besoins saisonniers**. Le dispositif géothermique a, en effet, été dimensionné pour délivrer, en période estivale, une puissance de 1 030 kW pour le rafraîchissement, à partir d'une production au puits B20 (puits froid), et une puissance de 2 160 kW pour le chauffage en période hivernale, à partir d'une production au puits B16 (puits chaud).

L'injection dans le puits B16 a posé des problèmes, dès la mise en service du doublet en 1990. Après quelques tentatives d'inversion du flux géothermal, **l'exploitation a été privilégiée pour le chauffage selon le sens favorable correspondant à une production au puits B16 et à une injection au puits B20**.

Le débit d'exploitation maximal en mode chauffage était alors de 120 m³/h (nettement inférieur au débit maximal espéré de 200 m³/h) pour une température de production de 27 °C et un rejet dans l'aquifère à 13 °C. La puissance thermique était alors proche de 1 950 kW.

À partir de 2013, suite à un problème technique lié au variateur de la pompe, **le sens de fonctionnement a dû être inversé (B20 vers B16)**. **L'injectivité du puits B16 s'est rapidement dégradée, limitant depuis lors le débit d'exploitation à une valeur de 40 m³/h**.

Cette valorisation de la ressource géothermale ne correspond pas à la part d'énergie renouvelable initialement envisagée pour l'alimentation des bâtiments, et des travaux sont envisagés en 2020 pour améliorer les conditions d'exploitation du doublet.

3.1.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération

Les ouvrages ont été réalisés entre le 17 juillet 1989 et le 20 septembre 1989 pour le **forage B16** (soit une durée de **66 jours**), et entre le 30 septembre 1989 et le 30 novembre 1989, pour le **forage B20** (soit une durée de **62 jours**). Ces travaux de forage ont été menés en deux temps pour les deux ouvrages, avec une **interruption de deux semaines entre la phase de forage et la mise en place des complétions, causée par l'attente de réception de matériaux**.

Le puits B16, au niveau de la Tour Crystal, est un forage vertical qui atteint, à 615 m de profondeur, les formations argileuses de l'Aptien. Le puits a été foré en diamètre 17"1/2 jusqu'au toit du réservoir et **un tubage en acier de diamètre 13"3/8 a été mis en place pour couvrir l'ensemble de la section** (entre 0 et 521 m). Le forage du réservoir a été réalisé en diamètre 12"1/4, avec un alésage en 15". Le réservoir est équipé d'une complétion comportant une colonne de captage pré-gravillonnée de calibre 1 à 2,5 mm en acier inoxydable à double paroi de type Johnson (*i.e.* une paroi intérieure à fil enroulé de diamètre 5" et une paroi extérieure à nervures repoussées de diamètre 8"). **L'espace annulaire a été comblé par des graviers siliceux de calibre 1 à 2,5 mm. L'ouverture des crépines (slot) est de 0,8 mm.**

La coupe technique du forage B16, réalisée par Gaudriot, est présentée ci-dessous (Figure 15). Elle comporte une erreur concernant le slot des crépines (0,8 mm et non 0,6 mm comme indiqué sur la coupe).

Le puits B20, au niveau de la Tour Mirabeau, est un forage dévié de 654 m de profondeur (soit 615 m en profondeur verticale). Il a également atteint les formations argileuses de l'Aptien. La déviation du forage est orientée vers le sud-ouest (azimut 214,6°) et inclinée de 40° par rapport à la verticale, ce qui induit un déplacement horizontal de 204 m à la profondeur de 560 m. En plus de la distance entre les têtes de puits du doublet, cette déviation a permis d'obtenir un écartement de 512 m entre les points d'impact des deux forages, au toit du réservoir. Le forage B20 a été foré en diamètre 15" jusqu'à 119,5 m de profondeur et un tubage en acier de diamètre 13"3/8 a été mis en place pour couvrir cette première section. Le forage a ensuite été poursuivi en diamètre 12"1/4 jusqu'à 560 m et un **liner en acier de diamètre 9"5/8 a été positionné entre 74,85 et 560 m** (au toit des formations des sables de Frécambault). Le forage du réservoir a été réalisé en diamètre 8"1/2, avec un alésage en 15". Le réservoir a également été équipé d'une complétion comportant une colonne de captage pré-gravillonnée de calibre 1 à 2,5 mm en acier inoxydable à double paroi (*i.e.* une paroi intérieure à fil enroulé de diamètre 5" et une paroi extérieure à nervures repoussées de diamètre 8"). **L'espace annulaire a été comblé par des graviers siliceux calibrés de 2,5 à 5 mm. L'ouverture des crépines (slot) est de 0,75 mm. Un tube plein a été placé dans la colonne de captage entre 582,96 et 593,20 m, au droit des formations argileuses de Tégulines.**

La coupe technique du forage B20, réalisée par CFG Services, est présentée ci-dessous (Figure 16). Elle comporte une erreur concernant le calibre du massif de graviers (2,5 à 5 mm et non 1 à 2,5 mm, comme indiqué sur la coupe).

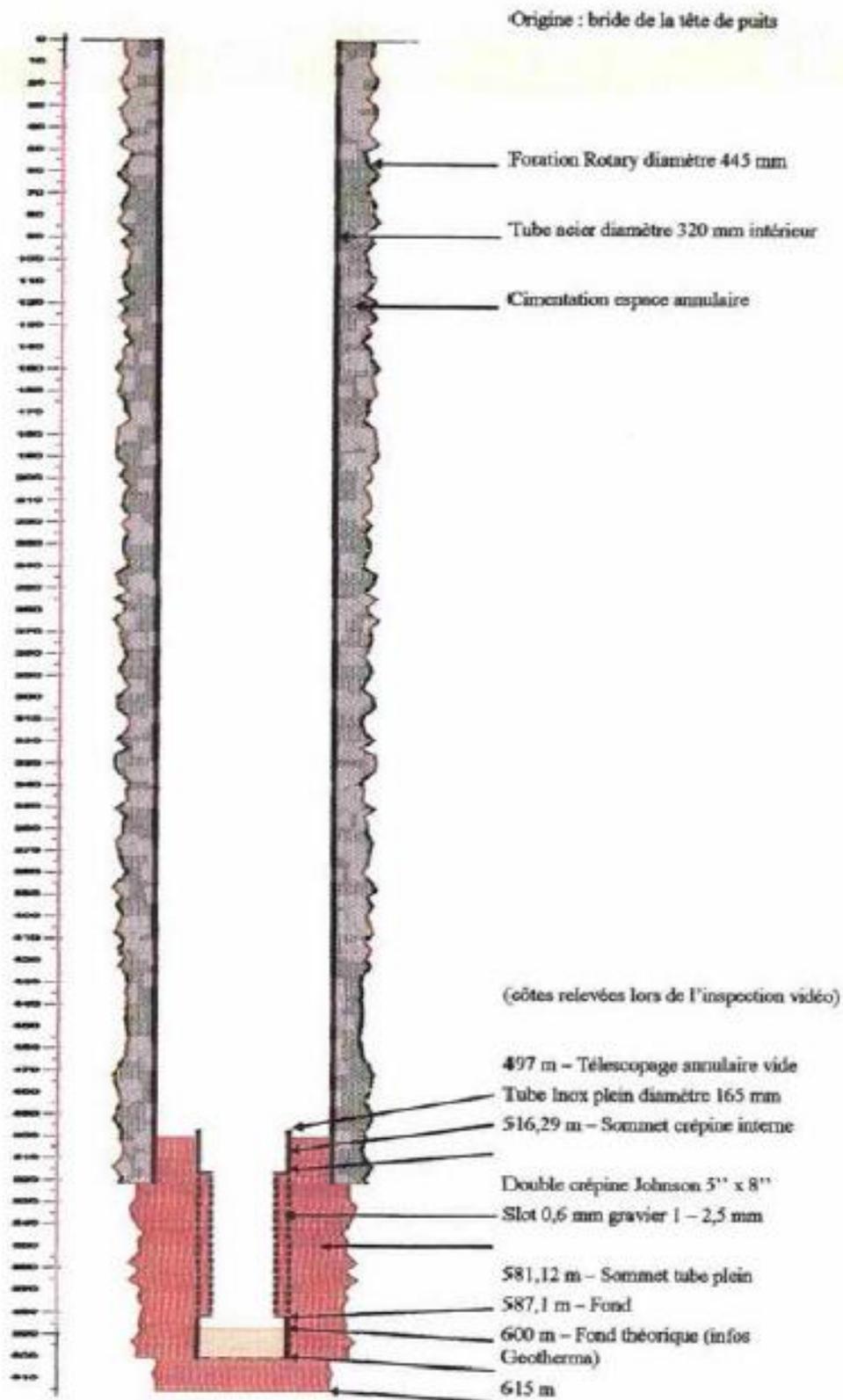


Figure 15 : Coupe technique du forage B16 d'après Gaudriot.
À noter que le slot des crépines est de 0,8 mm (erreur sur la coupe ci-dessus).

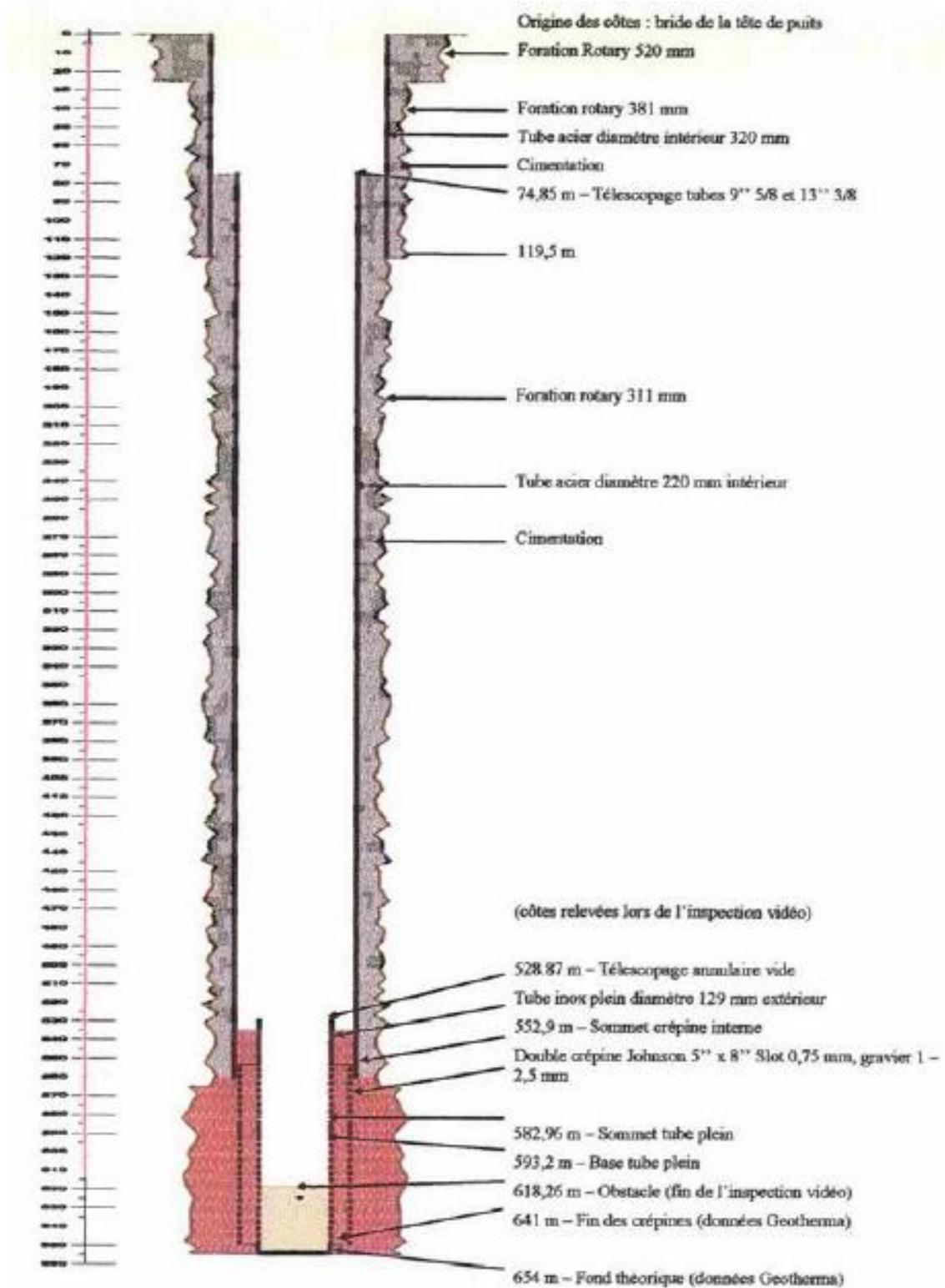


Figure 16 : Coupe technique du forage B20 d'après Gaudriot.
 À noter que le calibre du massif de graviers est de 2,5 à 5 mm (erreur sur la coupe ci-dessus).

À l'origine, le niveau statique dans le puits B16 était de 19,5 m/sol et de 19,3 m/sol dans le puits B20.

Les deux forages ont fait l'objet d'un traitement par injection d'hexa-méta-phosphates avec, en plus, **une injection d'eau oxygénée pour le puits B20**. Des pompages de développement ont ensuite été menés par paliers de débits jusqu'à 160 m³/h pour les deux puits. Les **essais de longue durée (72 heures) au débit de 160 m³/h** ont ensuite conclu la phase de développement des deux forages.

Les essais de pompage du **puits B16** ont permis d'évaluer **la transmissivité du réservoir à 530 D.m (soit 5,3.10⁻³ m²/s)** et un **indice de productivité de 6,5 m³/h/m**. L'eau, en tête de puits, présentait une température de 27 °C.

Pour le **puits B20**, l'interprétation des essais a donné des **valeurs inférieures pour la transmissivité, estimée à 300 D.m (soit 3.10⁻³ m²/s), et l'indice de productivité a été évalué à 3,7 m³/h/m**. L'eau en tête de puits présentait également une température de 27 °C.

Les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir de l'Albien, au niveau des forages B16 et B20, étaient donc bonnes en production. Un test d'interférences entre les deux ouvrages a permis de confirmer la continuité du réservoir (après 71 heures de pompage, le rabattement induit était alors de 1,84 m).

L'épaisseur des sables propres a été évaluée à 37 m, au niveau du forage B16 (19 m de sables de Frécambault, 17 m de sables de Drillons et 1 m de sables verts), et à 64 m au niveau du forage dévié B20 (33 m de sables de Frécambault, 22 m de sables de Drillons et 9 m de sables verts).

L'eau produite présentait une salinité de 0,26 g/L et un pH de 7,7.

Les données décrites ci-dessus, correspondant aux caractéristiques initiales des ouvrages et du réservoir, sont synthétisées dans les deux tableaux suivants (Tableaux 1 et 2).

Opérations	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur (m)	Fonction	Profil	Tubages	Diamètre forage au réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)	Longueur forée dans le réservoir (m)
Paris, Tours AGF (Crystal et Mirabeau)	B16 (Crystal)	1989 66 jours	615	réversible (puits chaud)	vertical	acier 13"3/8 (0 à 521 m)	trou 12"1/4 alésé 15"	crépine inox double paroi 5" x 8" pré-gravillonnée, calibre 1 à 2,5 mm, gravier annulaire calibre 1 à 2,5	0,8	83,71	67
	B20 (Mirabeau)	1989 62 jours	654 (dévié) 615 (vert.)	réversible (puits froid)	dévié (40°, Az 214,6°)	acier 13"3/8 (0 à 119,5 m) et 9"5/8 (74,85 à 560 m)	trou 8"1/2 alésé 15"	Idem B16 sauf gravier annulaire calibre 2,5 à 5 mm et tube plein face aux formations argileuses Tegulines	0,75	90,86 (55,12 disponible à cause obstacle)	67

Tableau 1 : Conception des forages du doublet des Tours AGF (Paris 75015).

Forage	Épaisseur de sables propres (m)	Traitement / Développement	Niveau statique (m/sol)	Durée essai (h)	Débit essai (m ³ /h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Indice de productivité (m ³ /h/m)
B16 (Cristal)	37	Hexa-méta-phosphate et pompage	19,5	72	160	24,6	5,3.10 ⁻³	6,5
B20 (Mirabeau)	50	Hexa-méta-phosphate et eau oxygénée	19,3	72	160	43,2	3.10 ⁻³	3,7

Tableau 2 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet des Tours AGF (Paris 75015).

3.1.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation

Exploitation du doublet de B16 vers B20 (sens favorable) de 1990 à 2012

Les premières difficultés, au niveau de l'exploitation, sont apparues lors des essais d'injection en avril 1990, après l'équipement et le développement des forages, et suite aux essais de production de longue durée. Le rapport de fin de sondage indique que l'essai en réinjection d'avril 1990, dans le **sens B16 vers B20** (*i.e.* B16 producteur et B20 injecteur), n'a pas présenté de difficultés, avec des débits stables en injection et des **pressions inférieures à 2,5 bar** en tête de forage. En revanche, le rapport indique que, **lors de la réinjection dans le forage B16** (et la production dans le forage B20), **les pressions augmentaient très rapidement jusqu'à la cavitation de la pompe immergée, dans le puits B20. La pression enregistrée en tête de puits était alors de 8 bar.**

Cette augmentation soudaine des pressions d'injection dans le forage B16 s'est, de nouveau, présentée en juillet 1990, lors de nouveaux essais, malgré un traitement des deux forages par injection d'hexa-méta-phosphates, au préalable, puis le rejet à l'égout (pendant trois jours) des eaux produites par le puits B20, avant la réinjection dans le forage B16, afin d'obtenir une eau claire. Les indices de productivité, dans le forage B16, étaient assez bons (2,5 m³/h/m pour un débit proche de 120 m³/h). **Les essais d'injection, dans le forage B16, montraient en revanche des indices d'injectivité bien plus faibles, évalués à 0,6 m³/h/m.**

Le dispositif a été mis en exploitation, lors la première utilisation du doublet pour le chauffage, dans le sens de production du puits B16 et d'injection dans le puits B20, avec un débit de 120 m³/h, sur la période de décembre 1990 à avril 1991. Ce débit était inférieur au débit d'exploitation espéré de l'ordre de 200 m³/h. Au moment du changement de flux, en période estivale, à partir d'avril 1991, les pressions en injection ont rapidement augmenté en tête de puits B16.

Les hypothèses faites par l'exploitant, au moment de la baisse d'injectivité, dans le forage B16, lient l'augmentation de la pression à la **réinjection d'air dans le réservoir provoquant le colmatage du puits B16**. Ces hypothèses font suite à l'observation de prise d'air sur les purgeurs, au niveau de la boucle de surface. Une **unité de dégazage** a alors été mise en place sur les deux forages.

Compte-tenu des difficultés d'injection dans le puits B16, **le doublet a été exploité dans le sens dit « favorable » de production, dans le puits B16, et de réinjection, dans le puits B20, jusqu'en 2012.**

Une étude des conditions d'injection et de production du doublet a été réalisée en 2010. Les pressions d'injection, en tête du puits B20, étaient alors de 4,6 bar, à 100 m³/h, et de 5,5 bar, à 130 m³/h. Une analyse physico-chimique et bactériologique du fluide avait permis d'écarter les causes de colmatage des ouvrages liées à des phénomènes bactériologiques, au piégeage de gaz (absence de gaz libres), à la variation de viscosité du fluide avec la température, et à la migration de particules.

Les conclusions de l'étude liaient alors les problèmes d'injection observés aux trois causes principales ci-dessous :

- un **défaut de conception de la complétion du puits B16 (tube d'injection trop court)** causant l'introduction de bulles d'air dans le fluide réinjecté ;

- l'utilisation d'eau oxygénée, lors du développement du puits B20, et la réinjection du fluide produit (potentiellement chargé en oxyde de fer) directement dans le puits B16, à l'issue du traitement ;
- le choix du type de crépines : la paroi extérieure à nervures repoussées, destinée préférentiellement à la production, provoquerait un dégazage intempestif en fonction des débits réinjectés.

Exploitation du doublet de B20 vers B16 (sens défavorable), à partir de 2013

Suite à un dysfonctionnement du variateur en 2012 (en défaut durant 75 jours), le doublet a été exploité dans le sens « défavorable » (en réinjectant dans le puits B16), à partir de 2013. Le débit de production a alors chuté rapidement de 120 à 40 m³/h suivant l'évolution de l'indice d'injectivité du puits B16. Les observations sur le forage B16 ont montré un colmatage progressif du forage B16 par des particules sableuses et d'argiles de taille micrométrique.

Les Figure 17 et Figure 18 présentent l'évolution des débits d'exploitation et des indices d'injectivité des forages, suivant les inversions de flux entre 2009 et 2016.

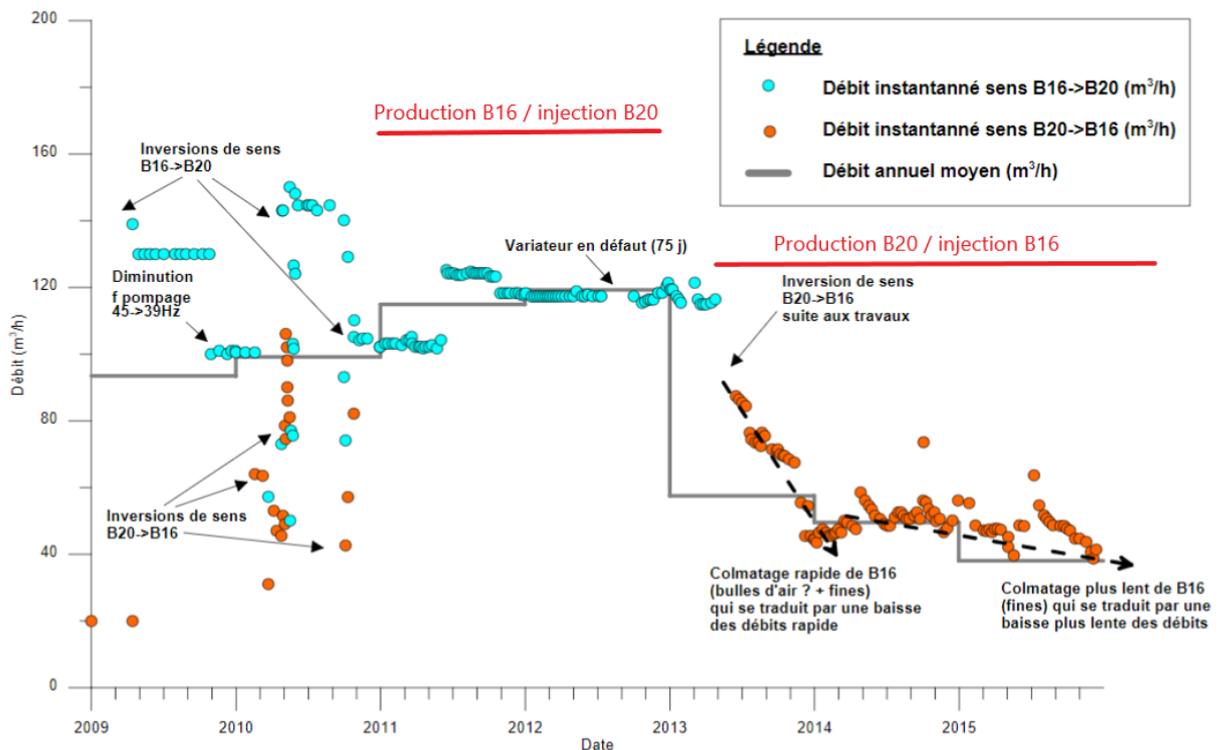


Figure 17 : Évolution des débits d'exploitation des puits B16 et B20 des Tours AGF de 2009 à 2016.

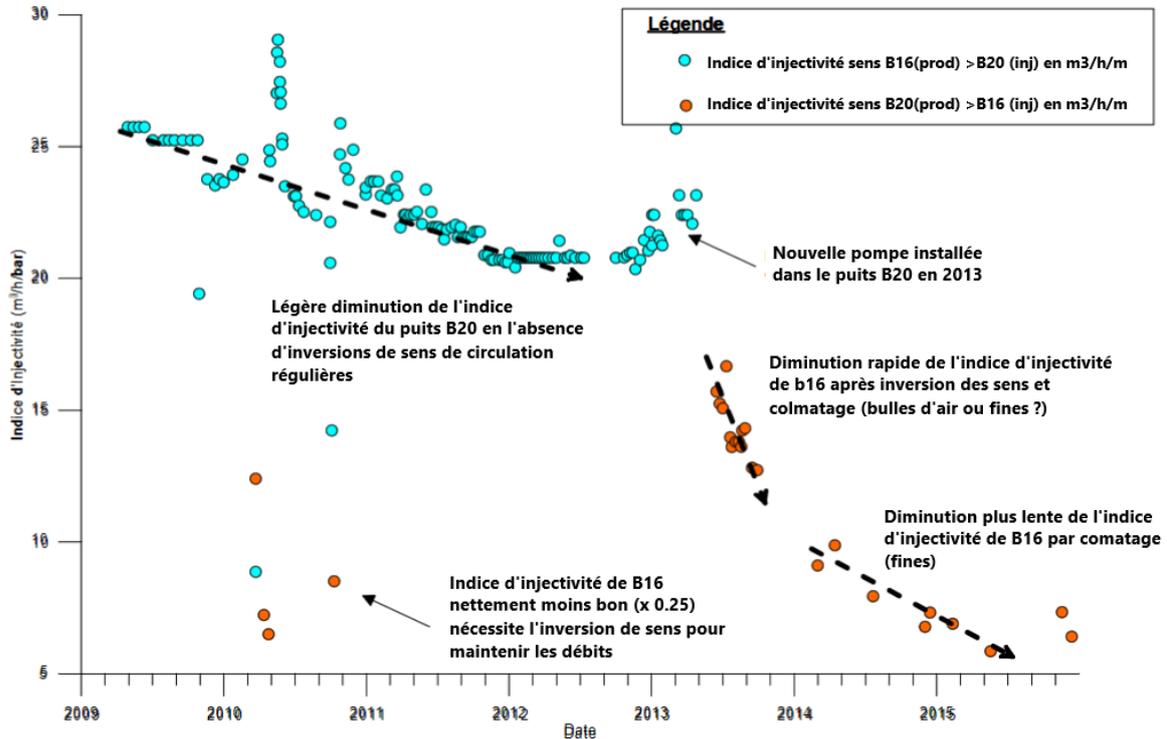


Figure 18 : Évolution de l'injectivité des ouvrages suivant le sens de circulation (B16 vers B20, puis B20 vers B16) de 2009 à 2016.

De nouveaux essais ont été réalisés en 2017 sur le forage B16, afin de restaurer le débit de production du doublet. Ils ont été menés suivant les trois phases successives ci-dessous :

- une phase d'injection comportant deux paliers de débit et une phase d'arrêt ;
- une phase de mise en production par pompage avec trois paliers de débits successifs ;
- une nouvelle phase d'injection comportant cinq paliers de débit.

L'analyse des résultats a permis de montrer une très nette amélioration de l'injectivité du puits B16, après sa mise en production (Figure 19) : la valeur du débit augmentant fortement de 20 à près de 120 m³/h pour une même pression d'injection, proche de 3,5 bar (soit un **indice d'injectivité augmentant d'un facteur 6, passant de 5,7 à 34,3 m³/h/bar).**

Des essais de production ont ensuite été menés sur le forage B16 sur des durées relativement courtes. Après une heure de production sur le puits B16, il ne semblait pas y avoir de dégradation significative de la productivité du puits et l'ouvrage pouvait produire à des débits de 150 m³/h.

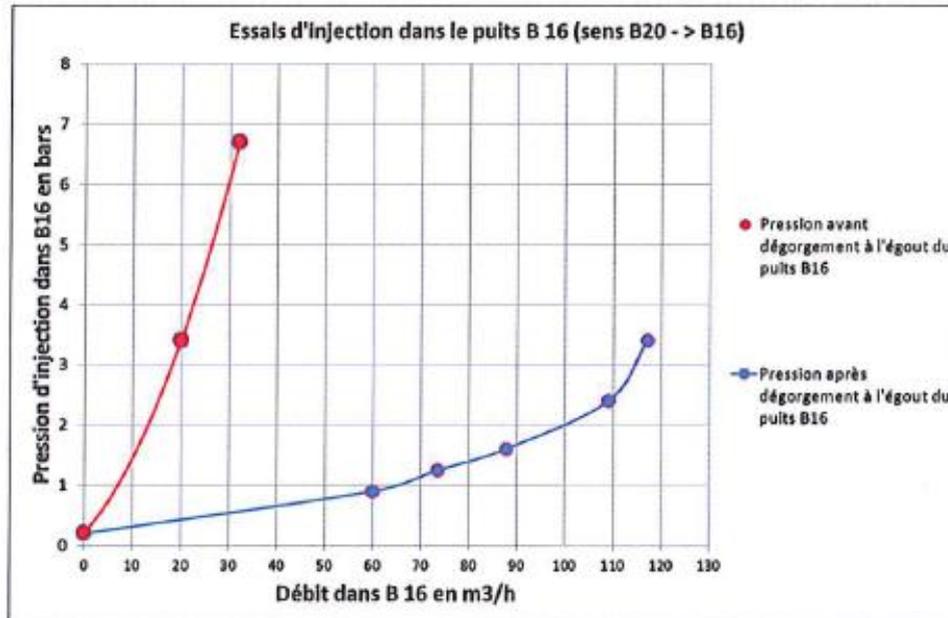


Figure 19 : Mesures de pressions d'injection sur le puits B16 (essai d'injection février 2017) d'après CFG Services.

Actuellement, le doublet fonctionne toujours dans le sens B20 vers B16, à un débit d'exploitation limité à 40 m³/h. Le changement de la pompe immergée dans le forage B16 était envisagé début 2020, afin de retrouver un débit d'exploitation plus important et d'améliorer l'apport énergétique de la géothermie pour cette opération.

3.1.4. Enseignements et préconisations relatives à l'opération des Tours AGF

Enseignements relatifs à l'exploitation du doublet

Les difficultés d'injection observées pour cette opération sont probablement dues à plusieurs causes combinées.

Dès la mise en service, le problème principal de fonctionnement du doublet réversible a concerné l'injection dans le puits B16. Cette difficulté est très probablement liée à plusieurs désavantages architecturaux du puits B16 (vertical) en comparaison avec le puits B20 (dévié et équipé d'un tube plein au droit du niveau des Argiles de Tégulines). Les hypothèses relatives à la présence de bulles d'air dans le fluide, due à l'entrée d'air au niveau des équipements de surface, et au dégazage intempestif lié au type de crépines (paroi externe à nervures repoussées adaptées à la production), ont été mentionnées, lors des différentes investigations. L'utilisation d'eau oxygénée, lors du développement du puits B20 peut également être mise en question puisqu'elle a pu engendrer la réinjection d'un fluide potentiellement chargé en oxyde de fer produit dans le puits B16.

Il est également probable que les conditions de réalisation des phases de traitement et de développement du réservoir aient été inadaptées (injection d'eau oxygénée dans le puits B20 et débit de pompage) et insuffisantes (durée des phases de dégorgeement / production des deux puits et filtration avant réinjection dans l'autre puits).

Les vitesses du fluide, à l'entrée des crépines, ont été estimées, en 2010, à 1,5 cm/s pour B16, et à 0,6 cm/s pour B20, pour un débit de 100 m³/h. Les seuils établis (Solages, 1979) de 1 cm/s pour limiter la mobilisation de particules fines semblent donc avoir été largement dépassés pour

le forage B16, notamment lors de la phase d'essai de longue durée réalisée à la fin des travaux de forage de 1989, à un débit maximal de 160 m³/h.

D'autre part, le débit critique du puits B16 a été évalué en injection à 80 m³/h en 2010. Lors de la mise en service du doublet en 1990, le débit d'exploitation de 120 m³/h était nettement supérieur à ce seuil évalué 20 ans plus tard. Ainsi, il est donc probable que la déstabilisation du proche réservoir du puits B16 ait pu intervenir dès les phases de développement et de tests en production et en injection.

Le fonctionnement du doublet a été contraint dans le sens favorable (injection dans le puits B20) jusqu'en 2012, puis des problèmes techniques (mise en défaut d'un variateur) ont ensuite contraint l'exploitation à se faire dans le sens défavorable (injection dans le puits B16), ce qui a alors accentué la chute des performances du dispositif. Le choix du calibre du massif de graviers du puits B20 (2,5 à 5 mm au lieu de 1 à 2,5 mm pour B16) facilitant le passage de particules fines peut expliquer, au moins en partie, la dégradation de l'injectivité du puits B16.

Les essais pratiqués en 2017 sur le puits B16 (amélioration très nette de l'injectivité suite à une phase de mise en production) permettent d'envisager une amélioration du fonctionnement du doublet, après la réalisation des travaux prévus en 2020.

Le tableau ci-dessous (Tableau 3) présente une synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet des Tours AGF depuis sa mise en service en 1990.

1990 : difficulté à l'injection (B16 injecteur et B20 producteur) et fortes pressions enregistrées en tête de puits B16 (8 bar)
1990-1991 : production dans B16 et injection dans B20 à 120 m ³ /h (sens favorable)
1991 : augmentation des pressions d'injection en tête de B16, lors du changement de flux
1991-2012 : fonctionnement en production dans B16 et injection dans B20 à 120 m ³ /h
2012 : défaut du variateur
2012-2015 : changement de flux (production B20, injection B16, <i>i.e.</i> sens défavorable) et débit réduit à 80 m ³ /h puis à 40 m ³ /h. Colmatage progressif de B16 par particules
Actuel : débit d'exploitation de 40 m ³ /h dans le sens défavorable (B16 injecteur et B20 producteur)
2020 : travaux prévus pour restaurer la productivité des ouvrages et revenir à des débits > 80 m ³ /h

Tableau 3 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet des Tours AGF.

Préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Au-delà du contrôle de l'intégrité des puits (état des tubages et des cimentations, état des crépines et présence du massif filtrant), qui permettra d'évaluer l'état des ouvrages, après trente années d'exploitation, et de la mise en œuvre d'un programme de nettoyage et de développement du réservoir adapté (débit, durée et filtration notamment), afin d'obtenir une amélioration du fonctionnement du dispositif, des investigations complémentaires pourraient être menées lors des travaux de réhabilitation du doublet prévus en 2020.

Ces investigations pourraient comprendre un bilan hydrodynamique approfondi permettant de suivre l'évolution des paramètres de fonctionnement du doublet (débits, rabattements, pressions d'injection, propriétés physico-chimiques et bactériologiques du fluide), avant et après les travaux de réhabilitation.

Il serait également important de pouvoir identifier les niveaux producteurs en fonction des débits testés et de caractériser les venues de particules fines dans les puits pour pouvoir adapter les équipements de la boucle géothermale et maîtriser les conditions d'exploitation, en particulier vis-à-vis de l'injectivité des ouvrages.

3.2. OPÉRATION D'ISSY-LES-MOULINEAUX (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 2013

3.2.1. Contexte et problématique de l'opération

Vingt-trois ans après le début d'exploitation du doublet (réversible) des Tours AGF, l'opération géothermique d'Issy-les-Moulineaux (92) a été mise en service en 2013. Un doublet conventionnel (constitué d'un puits producteur ILM1 et d'un puits injecteur ILM2 non réversibles) capte également les niveaux sableux de l'Albien.

Ce doublet alimente en chaleur le Fort d'Issy-les-Moulineaux grâce également à un appoint énergétique.

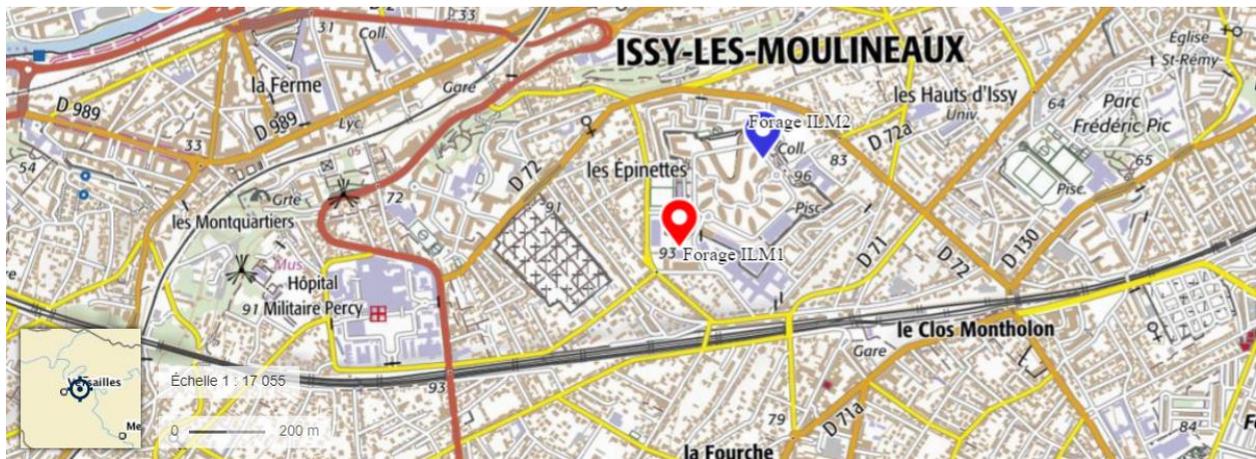


Figure 20 : Localisation du forage producteur ILM1 et du forage injecteur ILM2 du doublet géothermique d'Issy-les-Moulineaux (92).

La puissance visée du dispositif était évaluée à environ 3,5 MW, avec un débit d'exploitation maximal de 200 m³/h. En phase de conception, la part d'énergie renouvelable de l'opération était estimée à 78 %.

Initialement, la puissance du doublet était de l'ordre de 3 MW, avec un débit de production atteignant 185 m³/h, une température de production de 29,2 °C et une température de réinjection de 13 °C.

Actuellement, le doublet fonctionne avec un débit limité à une valeur de 40 à 50 m³/h, suite à des difficultés rencontrées sur le forage de production ILM1 et des venues de particules fines dans le puits ILM2, qui ont progressivement colmaté l'ouvrage injecteur.

3.2.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération

Travaux de forage du doublet et caractérisation initiale du réservoir en 2012

Les forages de production ILM1 et d'injection ILM2 ont été réalisés entre juin 2011 et avril 2012. **Les travaux de forage, menés de façon discontinue (interruption durant la nuit et les week-ends), ont duré 107 jours pour chacun des deux puits.**

Une autorisation de fonctionner de manière continue (24h / 24h) a été obtenue pour le premier puits ILM1, après 70 jours de forage et l'arrivée d'un ingénieur « boue » sur site (faisant suite à de nombreuses difficultés techniques liées à des pertes de fluide de forage). Les travaux de forage du puits ILM2 ont été interrompus 15 jours en raison d'une panne de pompe, puis durant 10 jours à cause des intempéries.

Le puits de production ILM1 est un forage vertical de 645 m de profondeur, qui a atteint les formations argileuses de l'Aptien (épaisseur forée de 5 m). Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés sur toute leur hauteur, de diamètres 26" (de 0 à 70,53 m), 18"5/8 (de 0 à 191 m), et 13"3/8, mis en place au toit du réservoir (541 m). **Le réservoir a été foré en diamètre 12"1/4, puis alésé en diamètre 15"**.

La complétion du forage est constituée d'un liner en acier inoxydable (Inox 304 L) de **diamètre 8"5/8 (219 mm), comportant des sections crépinées (type JOHNSON à fil continu enroulé sur un tube comportant des perforations de 16 mm) et des tubes pleins positionnés, notamment, au droit des formations des Argiles de Tégulines et des argiles de l'Armance. La hauteur totale des tubes crépinés est de 54,2 m, le slot des crépines est de 0,8 mm et le calibre du massif filtrant est de 1 à 1,25 mm.** Le tube décanteur, fermé par un fond plat, est positionné de 624 à 636 m de profondeur (soit 12 m de hauteur).

La coupe technique et géologique, au niveau de la complétion du forage producteur ILM1, est donnée en Figure 21.

Le puits ILM1 a été développé par des techniques de soufflage et d'air-lift jusqu'à obtention d'eau claire, menées par phases successives, lors de deux périodes distinctes (de l'ordre de 4 et 14 jours) en un mois. Des essais de pompage ont ensuite été réalisés, comprenant 6 paliers de débits croissants entre 92 à 274 m³/h (débit maximal de la pompe). Les paliers d'une heure chacun ont été suivis d'une remontée de pression d'une heure et demie. **La productivité obtenue en fin d'essai par paliers est bonne, avec un indice de 11,7 m³/h/m. Le débit critique n'a pas été atteint.**

L'interprétation des **essais de longue durée (72 heures, au débit moyen de 216 m³/h)** a permis d'évaluer la transmissivité du réservoir à 5,6.10⁻³ m²/s (interprétation de la baisse de pression -descente- en phase de production) et à 6.10⁻³ m²/s (interprétation de la remontée de pression). La température, en tête de puits, était de 29,2 °C. La productivité en fin d'essai de longue durée est de 10,1 m³/h/m.

Le puits d'injection ILM2 est un forage dévié (inclinaison 27° au toit du réservoir, azimut 51,7°), avec un départ en déviation, à environ 160 m de profondeur. Le déplacement horizontal du forage est de 119,5 m, ce qui a permis d'obtenir un écartement entre les impacts au réservoir des forages de 506 m. La profondeur du forage est de 701 m (soit 665 m en profondeur verticale). Par rapport au puits ILM1, le puits ILM2 a été arrêté plus profondément dans les argiles de l'Aptien (épaisseur forée de 29 m). Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés sur toute leur hauteur, de diamètres 18"5/8 (de 0 à 124,3 m) et 13"3/8 descendu jusqu'au toit du réservoir (560 m). **Le réservoir a été foré en diamètre 12"1/4, qui n'a pas été alésé (contrairement au forage ILM1).**

La complétion du forage est constituée d'un liner en acier inoxydable (Inox 304 L) comportant une **crépine pré-gravillonnée (calibre 1,16 - 1,7 mm), de type JOHNSON MuniPak, à double paroi de diamètre interne 8''5/8 (fil enroulé) et externe 10''5/8 (à nervures repoussées)**. Le slot des crépines est de 0,8 mm.

Contrairement à la complétion du puits ILM1, les crépines ont été positionnées sur quasiment toute la hauteur de l'Albien (pas de tube plein au droit des niveaux des argiles de Tégulines et de l'Armance), entre 564,7 et 663,7 m de profondeur ; seule la base de l'Albien est couverte par un tube plein (de 663,7 à 670,9 m). Une section crépinée se trouve, à nouveau, au droit de la partie sommitale de l'Aptien (de 670,9 à 676 m) et un tube décanteur fermé par un fond plat constitue la partie basse de la complétion (soit sur une hauteur de 24 m). La hauteur crépinée totale est de 104,1 m (soit quasiment le double par rapport au forage ILM1).

La coupe technique et géologique, au niveau de la complétion du forage injecteur ILM 2, est donnée en Figure 22. Sur la droite de cette illustration, la courbe du pourcentage cumulé du débit (dont la valeur indiquée est de 73 m³/h) montre que la totalité du débit provient de la première moitié supérieure du réservoir, depuis les sables de Frécambault jusqu'à la partie sommitale des sables verts.

Le développement du puits ILM2 a également été réalisé par les techniques de soufflage et d'air-lift, par phases successives menées sur 10 jours. Les essais de pompage ont ensuite comporté 4 paliers d'une heure, à débits croissants (jusqu'à 251 m³/h) et enchaînés, puis une remontée de pression durant 3 heures. Deux paliers complémentaires ont été réalisés le lendemain, suivis d'une remontée de pression de 3 heures. **La productivité de l'ouvrage, en fin d'essai par paliers, est très bonne, avec un indice de 9,4 m³/h/m. Le débit critique n'a pas été atteint.**

Les essais de longue durée (**52 heures, au débit moyen de 244,4 m³/h**) ont montré une transmissivité similaire de 5,94.10⁻³ m²/s (descente), voire meilleure, de 7,58. 10⁻³ m²/s (remontée), et une température, en tête de puits, de 28,4 °C, légèrement inférieure par rapport au puits producteur ILM1. La productivité en fin d'essai de longue durée est de 6,4 m³/h/m.

Lors des essais de production sur ILM2, le suivi piézométrique du forage ILM1 a montré l'impact hydraulique du pompage, après 40 min de production, et le rabattement final était de 3,81 m.

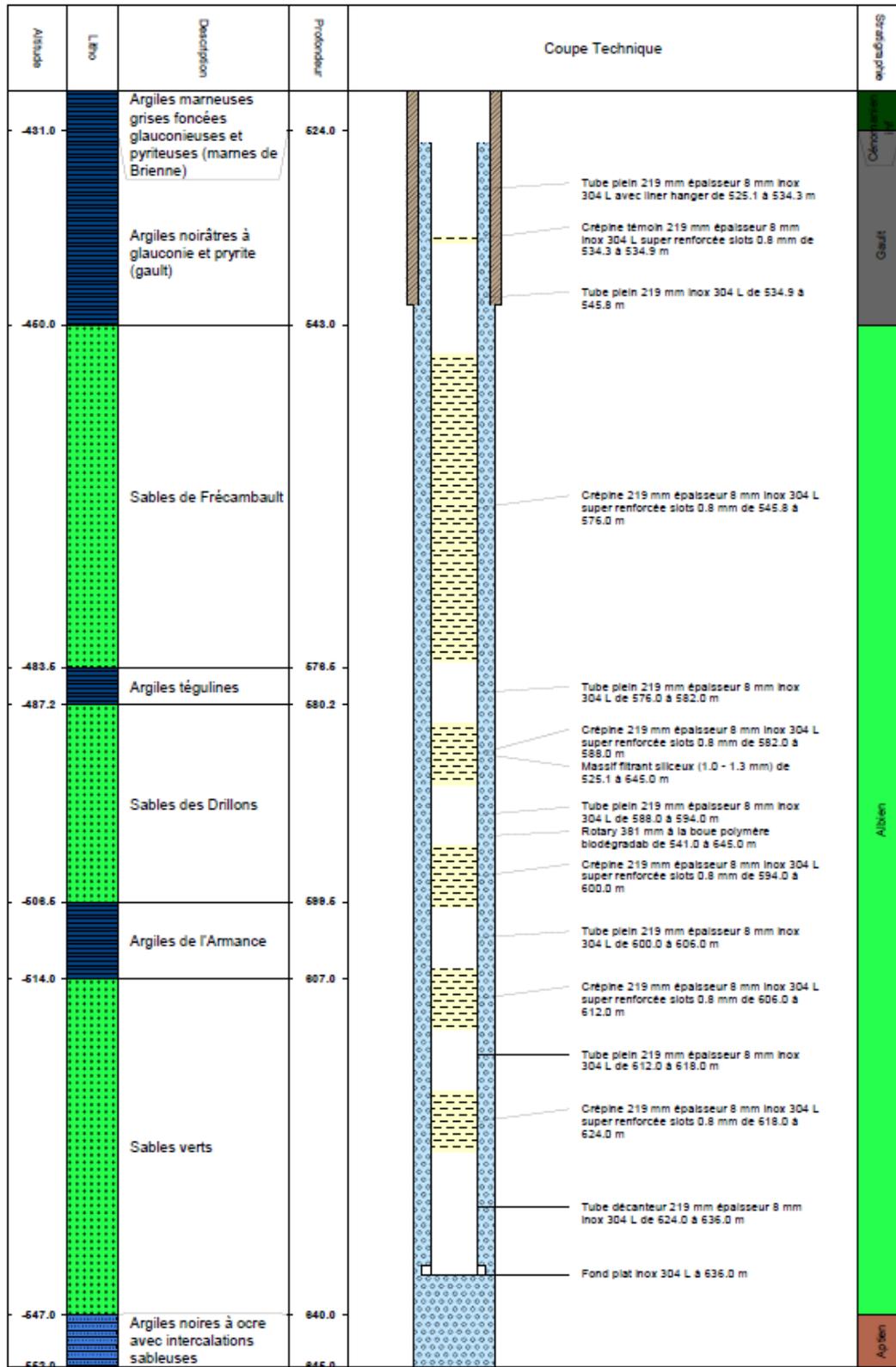


Figure 21 : Coupe technique de la complétion du forage de production ILM1 (d'après DOE).

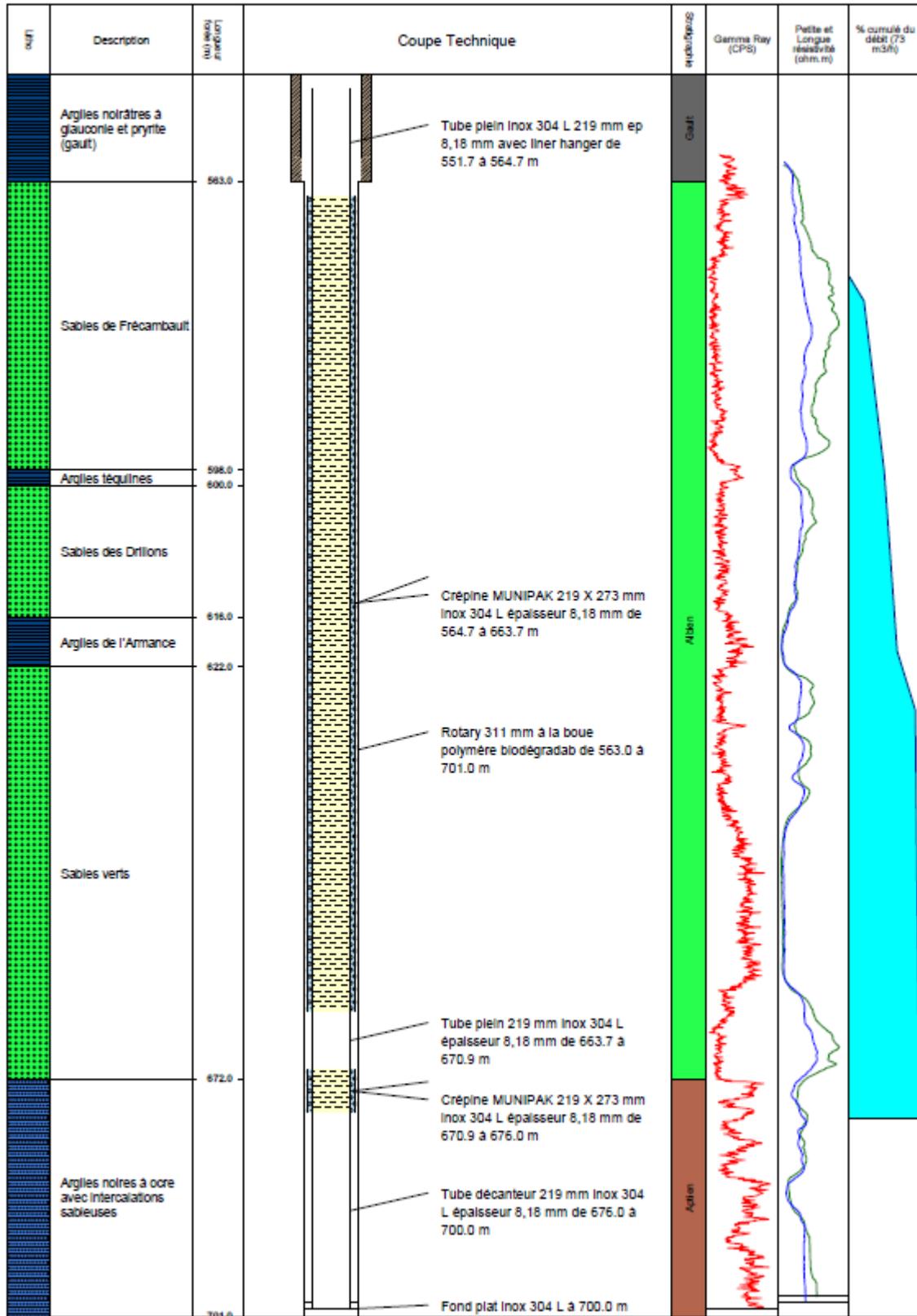


Figure 22 : Coupe technique de la complétion du forage d'injection ILM2 (d'après DOE).

La formation de l'Albien a été traversée par le forage vertical ILM1 entre 543 et 640 m de profondeur, soit une épaisseur de 97 m. Le forage dévié ILM2 a traversé le réservoir entre 563 et 672 m de profondeur, soit sur une longueur forée de 109 m et une épaisseur (verticale) correspondante de 99 m. Les épaisseurs sont équivalentes et **la longueur forée, dans le réservoir, est supérieure d'un peu plus de 10 % dans le forage dévié ILM2.**

Les analyses granulométriques réalisées sur les formations sableuses du réservoir sont relativement semblables, avec une composition majoritaire de sables fins à moyens, d'une dimension généralement inférieure à 2 mm. Les sables verts sont un peu plus grossiers que les formations des sables de Frécambault et des sables de Drillons. À noter qu'un filtre cyclonique et deux filtres à cartouche de maille de 130 µm ont été mis en place, au cours des essais.

Les niveaux producteurs ont été identifiés, lors des diagraphies de production (micro-moulinet) réalisées à un débit moyen de 73 m³/h. **Les épaisseurs productrices ont été estimées à 50,2 m pour le forage producteur ILM1 et 95,1 m pour le forage injecteur ILM2.**

La principale zone de production du forage ILM1 semble provenir des sables de Frécambault (66,5 % du débit total), puis des sables de Drillons (29 %, dont 15 % provenant d'un niveau peu épais de 0,5 m seulement). Au niveau du puits ILM2, la contribution des sables de Frécambault est également majoritaire (49 %), mais la contribution des sables verts est plus importante (33 %) et celle des sables de Drillons représente 18 % du débit total.

L'ensemble des données décrites ci-dessus sont synthétisées dans les deux tableaux suivants (Tableau 4 et Tableau 5).

L'eau produite est de type bicarbonaté calcique et magnésien, avec un fluide faiblement minéralisé (environ 280 µS/cm) et dépourvu d'oxygène dissous. Les valeurs du pH étaient de 7,40 et 7,78. Les analyses bactériologiques ont montré l'absence de germes pathogènes.

Les essais du puits ILM1 ont mis en évidence une venue d'eau anormale par l'espace annulaire de la colonne captante (au sommet du *liner hanger* positionné à 525,1 m de profondeur), chargée en matières en suspension, représentant 11 % du débit total de production. Ce problème fera l'objet d'une remédiation, en septembre 2012 (cf. § 3.2.3).

Opération	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur (md)	Fonction	Profil	Tubages	Diamètre forage au réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)	Longueur forée réservoir (mD)
Issy-les-Moulineaux (92)	ILM1	2011 107 jours (travaux discontinus)	645	producteur	vertical	acier 26" (0 à 70,53 m), 18"5/8 (0 à 191 m) puis 13"3/8 (0 à 541 m)	trou 12"1/4 alésé 15"	crépine inox 304 L 8"5/8 (type JOHNSON à fil continu enroulé sur tube avec perforations de 16 mm) + tubes pleins (notamment au droit des argiles Tégulines et de l'Armance), gravier annulaire calibre 1 à 1,25 mm	0,8	54,2	97
	ILM2	2012 107 jours (travaux discontinus)	701 (dévié) 665 (vert.)	injecteur	dévié (27°, Az 51,7°)	acier 18"5/8 (0 à 124,3 m) puis 13"3/8 (0 à 560 m)	trou 12"1/4	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK double paroi 8"5/8 x 10"5/8 (pré-gravillonnée : calibre 1,16 à 1,7 mm) + tubes pleins (en fond d'ouvrage)	0,8	104,1	109

Tableau 4 : Conception des forages du doublet d'Issy-les-Moulineaux (92).

Forage	Épaisseur utile d'après flowmétrie (m)	Traitement / Développement	Niveau statique (m/sol)	Débit max dvlpt. (m ³ /h)	Productivité après développement (m ³ /h/m)	Durée essai (h)	Débit essai (m ³ /h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Indice de productivité/injectivité (m ³ /h/m)
ILM1	50,2	soufflage + air-lift (4 + 14 jours) + essai par paliers	53,3	274	11,7	72	216	21,4	5,6.10 ⁻³ (descente) 6.10 ⁻³ (remontée)	10,1 (IP)
ILM2	95,1	soufflage + air-lift (10 jours) + essai par paliers	49,3	251	9,4	52	244	38,1	5,94.10 ⁻³ (descente) 7,5810 ⁻³ (remontée)	6,4 (IP) 4,2 (II)

Tableau 5 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet d'Issy-les-Moulineaux (92).

Essais d'injection du forage ILM2 en 2012

Quatre essais d'injection ont été réalisés sur le forage ILM2, entre juin et décembre 2012.

Le premier essai d'injection (juin 2012) a été réalisé suite aux travaux de forage et au développement du puits. Après rejet à l'égout et obtention d'eau claire, le fluide produit par le puits ILM1 a été réinjecté dans le puits ILM2. Ce premier essai a comporté :

- un **test par paliers** de débit (valeur maximale enregistrée : 201,6 m³/h) sur des durées de 2 à 3 heures. En fin de test, la pression enregistrée en tête de puits était de 1,8 bar et **l'indice d'injectivité a été estimé à 3 m³/h/m** ;
- un **test de longue durée** (71 h 35 interrompues, à cause d'une fuite sur une canalisation en surface) a ensuite été réalisé, à un débit moyen de 164,37 m³/h. En fin de test, la pression en tête de puits était de 5,24 bar (pour un débit réduit à 140,8 m³/h) et **l'indice d'injectivité était alors réduit d'un facteur 2, avec une valeur de 1,38 m³/h/m**.

Le deuxième essai d'injection (juillet 2012) a comporté les mêmes types de tests donnant les résultats suivants :

- le **test par paliers** de débit (valeur maximale : 160,5 m³/h) a montré une pression en tête de puits supérieure (mesurée à 4,24 bar) et un **indice d'injectivité de 1,8 m³/h/m** ;
- le **test de longue durée** (26 h 10 interrompues, suite à la rupture du flexible en sortie du forage de production), au débit moyen de 138,97 m³/h, a montré une pression en tête de puits de 5,5 bar confirmant la valeur de **l'indice d'injectivité de 1,3 m³/h/m**.

Le troisième essai d'injection (juillet 2012) prévoyait de refaire le test de longue durée. Ce test a également été interrompu (après 1 h 37), à cause d'une rupture de flexible en amont du puits ILM2. La pression, en tête de puits, a cependant été enregistrée à 6,12 bar pour un débit de 123 m³/h, donnant un **indice d'injectivité encore réduit, avec une valeur de 1,15 m³/h/m**.

Suite à ce constat de perte d'injectivité de l'ouvrage, le forage ILM2 a été testé en production par pompage. Sa productivité s'est avérée moins bonne qu'à l'origine, avec une eau chargée en particules fines. Un premier nettoyage par soufflage a été réalisé fin août 2012 jusqu'à l'obtention d'eau claire.

Le quatrième essai d'injection (décembre 2012) a été réalisé, après l'opération de remédiation de septembre 2012 (nettoyage et nouveau développement du forage ILM2 ; **complément de graviers apporté à la colonne captante du forage ILM1** pour limiter la production de particules fines dans l'ouvrage de production, cf. § 3.2.3). Un test par paliers (de 3 heures) de débits (croissants de 92 à 162 m³/h) a permis d'atteindre un **indice d'injectivité pour le forage ILM2 de 4,2 m³/h/m**.

Le Tableau 6 et la Figure 23 ci-dessous présentent, de manière synthétique, l'évolution des indices de productivité et d'injectivité des puits ILM1 et ILM2, au fur-et-à mesure du déroulement des essais.

Mesure au puits	Date	Durée du test	Pression inj. (bar)	Débit inj. max (m ³ /h)	II (m ³ /h/m)	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
ILM1	12/2011	6 x 1h				273	11,7	Développement (essai par paliers)
	12/2011	72 h				216	10,1	Essai longue durée
	06/2012	6 x 1h				251	9,4 (ILM2)	Développement (essai par paliers)
	06/2012	52 h				244	6,4 (ILM2)	Essai longue durée
ILM2	06/2012	5 x 2h30	1,80	201,6	3,0			Essai 1 : test d'injection par paliers
	06/2012	71h35	5,24	140,8	1,4			Essai 1 : test d'injection longue durée
	07/2012	5 x 2h	4,24	160,5	1,8			Essai 2 : test d'injection par paliers
	07/2012	26h10	5,50	138,9	1,3			Essai 2 : test d'injection longue durée
ILM1 / ILM2	07/2012	1h37	6,12	149,7	1,2	123		Essai 3 : test d'injection longue durée
ILM2 / ILM1	12/2012	4 x 3h	/	161,6	4,2	162	11,1 (ILM1)	Essai 4 : test d'injection par paliers
	03/2013	7h				170	7,7 (ILM1)	Nettoyage forage après tests d'injection

Tableau 6 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (ILM1) et d'injection (ILM2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet d'Issy-les-Moulineaux, entre 2011 et 2013.

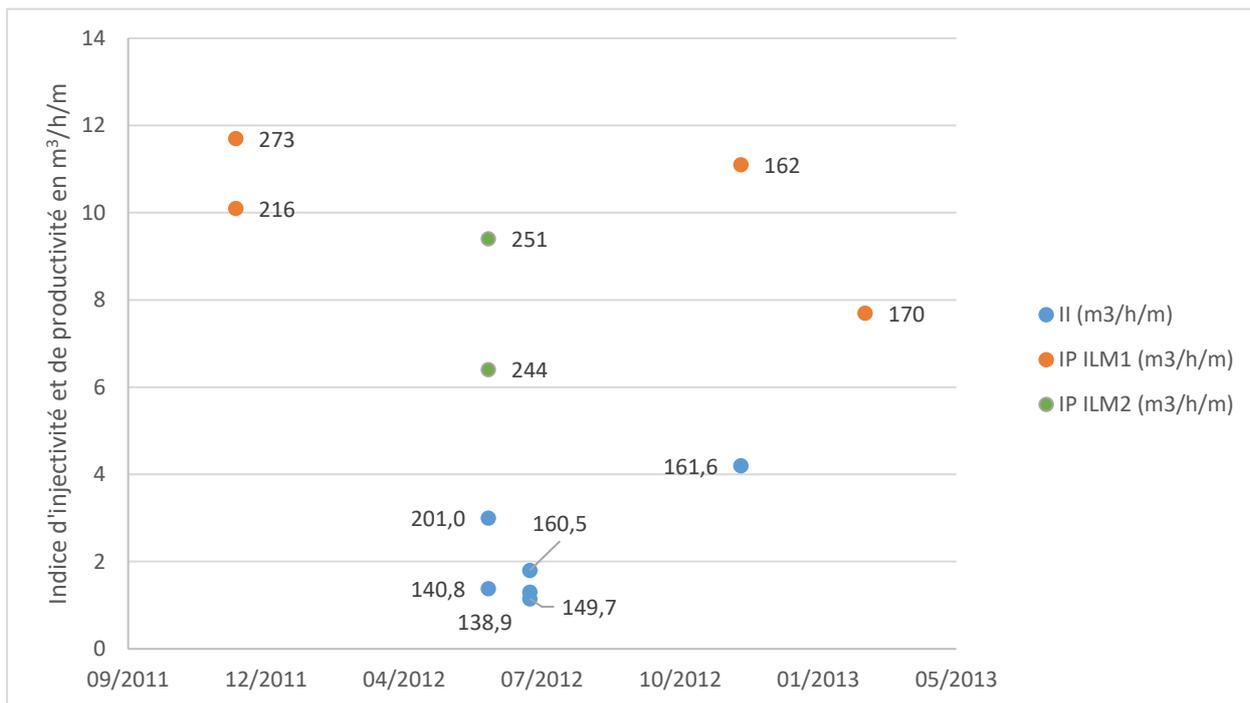


Figure 23 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (ILM1) et d'injection (ILM2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet d'Issy-les-Moulineaux, entre 2011 et 2013 (étiquette des données : débit en m³/h).

3.2.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation

Le doublet géothermique d'Issy-les-Moulineaux a été mis en service en juin 2013. Le débit d'exploitation envisagé était de 200 m³/h. Le débit d'exploitation, à la fin de l'année 2019, est limité à une valeur de 40 à 50 m³/h.

L'opération a été confrontée au problème lié à la dégradation de l'injectivité du puits ILM2, dès les premières phases d'essais de fonctionnement du doublet.

Le forage de production ILM1 a fait l'objet d'une déclaration de sinistre en février 2016, après 3 ans d'exploitation.

Plusieurs investigations et travaux ont été réalisés, depuis 2012, pour tenter de remédier aux problèmes rencontrés.

Restauration du massif filtrant du puits producteur ILM1 (septembre 2012)

Suite au constat de l'arrivée d'eau importante (chargée en particules fines) par l'annulaire du forage ILM1, ce puits a fait l'objet d'une première intervention en septembre 2012. **Un complément de graviers (304 litres) a été apporté, au niveau du sommet de la colonne de production, afin de restaurer la fonction du massif filtrant.**

Des essais de pompage et une inspection par caméra vidéo ont ensuite été réalisés pour développer le forage et contrôler la production de particules fines (mesure au cône Imhoff). L'interprétation des essais a permis de confirmer la transmissivité du réservoir ($5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

Mesures de turbidité des forages en production et nouvelle inspection du puits producteur ILM1 (avril 2014)

En avril 2014, suite à de nouvelles difficultés d'injection dans le forage ILM2, l'exploitant a entrepris de nouvelles investigations, comprenant des mesures de turbidité des eaux produites par les deux forages. Une nouvelle inspection vidéo du forage ILM1 a également été réalisée.

Lors du nettoyage du puits injecteur ILM2, la production assistée par air-lift a, d'abord, été intermittente, avant de se stabiliser. D'après les observations, les particules fines produites étaient, dans un premier temps, de nature argileuse, puis sableuse. Après la phase de nettoyage, **la taille des particules était inférieure à 80 µm, donc plus petite que la maille des filtres de la boucle géothermale en surface (130 µm).**

Les mesures de turbidité réalisées lors de la mise en production des puits (par air-lift, pour le puits ILM2, avec des débits supérieurs à 150 m³/h, et par pompage, pour ILM1, avec un débit final proche de 200 m³/h) sont présentées, ci-dessous en Figure 24. La production de particules fines est réduite en fin de phase de production.

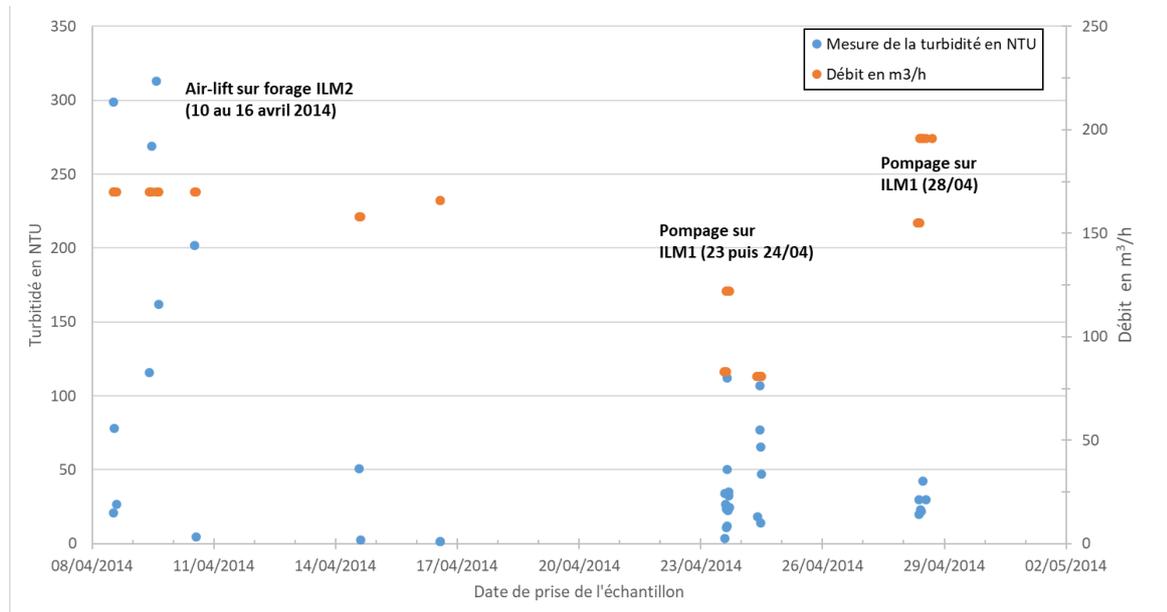


Figure 24 : Évolution de la turbidité des eaux produites lors du nettoyage des puits ILM1 et ILM2 du doublet d'Issy-les-Moulineaux, en avril 2014.

Les conclusions de ces investigations ont conduit à expliquer les causes de la dégradation d'injectivité du puits ILM2 par l'absence de graviers, dans la partie sommitale de la colonne de captage du forage producteur ILM1 (induisant l'entrée de particules fines dans la boucle géothermale), et la filtration insuffisante en amont de l'échangeur.

Travaux de réfection de la complétion du puits producteur ILM1 (2015)

Suite aux investigations de 2014, des travaux de réfection du puits ILM1 ont été réalisés par l'exploitant en vue de remédier aux défauts structurels de la complétion.

Ils ont consisté à mettre en place, au-dessus de la colonne de captage (liner), une **colonne d'extension en acier (de diamètre 8''5/8) d'une longueur de 30 m**, et d'augmenter ainsi la hauteur de réserve du massif filtrant limitée initialement à 15,7 m. Le remplissage complet de

l'espace annulaire de la colonne par du gravier (calibre de 0,8 à 1,4 mm) a été contrôlé par diagraphie (sonde gamma-gamma).

Ces travaux ont été complétés par une nouvelle phase de développement (par air-lift au débit de 180 m³/h et par pistonage), d'essais de pompage (paliers et longue durée) et d'inspection vidéo du forage.

Nouvelle inspection vidéo du puits ILM1 et filtration étagée (2018)

En 2018, une nouvelle inspection vidéo du puits ILM1 en production (au débit de pompage de 40 m³/h, puis de 100 m³/h en fin d'opération) a permis de suivre la turbidité du fluide et de réaliser des mesures de filtration étagée sur trois échantillons prélevés, pendant la production.

L'inspection vidéo a montré que l'essentiel des particules semble provenir de la section du puits supérieure, à la profondeur de 593 m. En-dessous, les **crépines sont partiellement ou totalement obstruées**. La section supérieure des crépines est très légèrement recouverte d'un dépôt, le massif filtrant reste visible et apparaît parfois partiellement colmaté. Il semble également que l'arrêt et la reprise des pompages induisent une augmentation de la teneur en particules dans le puits.

Les résultats de la filtration étagée sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 7).

Taille du filtre (µm)	Échantillon 1 (mg)	Échantillon 2 (mg)	Échantillon 3 (mg)
8	24,3	36	26
3	0,9	0,9	1,5
1	0,5	0,6	0,2
0,45	0,3	0,1	0
0,2	0	0,6	0

Tableau 7 : Résultats de la filtration étagée des échantillons prélevés au puits producteur ILM1.

La taille des particules est très majoritairement supérieure à 8 µm. Quelques particules ont un diamètre inférieur à 0,2 µm (cas de l'échantillon 2).

Une analyse par diffraction X a permis d'identifier la nature des particules provenant des échantillons filtrés. Ils sont ainsi, en majeure partie, constitués de quartz, de magnétite, de calcite, de mackinawite, de goethite et de feldspath. Il est possible qu'une partie de ces éléments soit due à la corrosion du tubage.

Flowmétrie en injection sur le forage ILM2 (2019)

Une flowmétrie en injection a été réalisée en janvier 2019 sur le forage ILM2. La pression, en tête de puits, était de 3 bar pour un débit d'injection compris entre 35 et 40 m³/h.

La Tableau 8 présente la répartition du débit selon des intervalles, dans le réservoir, identiques à ceux observés lors de la flowmétrie en production, réalisée en 2012 avec un débit supérieur (73 m³/h).

Bien que l'interprétation soit très limitée par les conditions de réalisation différentes (production ou injection, valeur du débit), la comparaison des résultats obtenus en 2012 et 2019 semble montrer une dissymétrie de l'écoulement au niveau du réservoir :

- la partie sommitale du réservoir (au-dessus de 574,5 m) ne contribuait pas à l'écoulement en 2012 alors qu'elle représente 14,3 % du débit d'injection en 2019 ;
- pour la section en-dessous de 650,8 m, la contribution de 4,1 % observée en 2012 devient nulle en 2019, car probablement colmatée.

Intervalle	Contribution en 2012 (production à 73 m ³ /h)	Contribution en 2019 (injection 35 à 40 m ³ /h)
Au-dessus de 574,5 m	0%	14,30%
574,5 -577,5 m	20,60%	14,10%
577,5 -598,2 m	28,80%	28,20%
598,2 -620 m	17,80%	21,90%
620 -627,2 m	25,30%	9,70%
627,2 -650,8 m	3,40%	11,90%
Au-dessous de 650,8 m	4,10%	0%

Tableau 8 : Évolution de la contribution des intervalles entre 2012 (en production) et 2019 (en injection) lors des flowmétries réalisées dans le forage injecteur ILM2.

D'après l'inspection vidéo du forage producteur ILM1 réalisée en 2019, ce puits produisait des particules fines majoritairement en-dessous de 593 m, et plus particulièrement entre 594,3 et 594,8 m de profondeur, dans la section crépinée située juste au-dessus du niveau des argiles de l'Armance, couvert par un tube plein (cf. Figure 21).

Opérations de nettoyage du puits producteur ILM1 et du puits injecteur ILM2 (mai 2019)

Ces travaux ont eu pour but de nettoyer les forages, limiter la venue des particules fines provenant du réservoir au niveau du puits producteur ILM1 et décolmater le puits injecteur ILM2. Ils ont été réalisés du 3 au 16 mai 2019 pour ILM1, et du 20 au 29 mai pour le puits ILM2.

Les opérations menées sur le puits ILM1 ont compris successivement :

- le brossage des tubages (18"5/8 et 13"3/8) et des crépines ;
- le contrôle du positionnement du massif filtrant dans l'annulaire et un nouvel ajout de graviers (1 m³ de calibre 0,8-1,2 mm et un peu plus de 0,5 m³ de calibre beaucoup plus grossier 4-8 mm) ;
- le développement du forage par air-lift, pendant 4 jours (avec augmentation progressive du débit de 20 à 40 m³/h, puis jusqu'à 126 m³/h) ;
- une diagraphie de contrôle des cimentations de l'ouvrage et une inspection vidéo de contrôle du massif filtrant.

L'opération menée sur le forage injecteur ILM2 a consisté à contrôler les cimentations des tubages et à procéder au nettoyage du puits par air-lift, pendant 6 jours (avec augmentation progressive du débit jusqu'à 55 m³/h, puis jusqu'à 120 m³/h). Les mesures de turbidité réalisées pendant la production sont présentées dans le Tableau 9 ci-dessous.

Date	23/05	23/05	24/05	24/05	27/05	27/05	27/05/	28/05	28/05	28/05	
Débit (m³/h)	40	50	100	100	120	120	120	120	120	120	
Turbidité en NTU	Début	18	30	12	50	15	30	30	20	8	7
	<i>Bottom/Up</i>	435	250	222	94	65	65	45	67	28	37
	<i>B/U + 5 min</i>					27					
	<i>B/U+10 min</i>			112			48		41	26	29
	<i>B/U+15 min</i>				48	47	34				
	<i>B/U+30 min</i>	120		80		64	29	30	15		10
	<i>B/U+45 min</i>			45					25		
	<i>B/U+1h</i>	80	20			30			10		
	<i>B/U+1h30</i>	35								9	

Tableau 9 : Évolution de la turbidité (valeurs NTU) en fonction du débit lors de la mise en production, par air-lift, du forage injecteur ILM2.

En début de mise en production (le 23/05), au débit faible de 40 m³/h, la turbidité du fluide remontant du fond du forage (« *Bottom/Up* » ou « *B/U* ») est très élevée (435 NTU) et baisse graduellement pour atteindre une valeur nettement inférieure (35 NTU), 1h30 après l'arrivée en surface du *Bottom/Up*.

En fin de mise en production (le 28/05), au débit de 120 m³/h, la turbidité du fluide est à un niveau acceptable, dès l'arrivée du *Bottom/Up* (37 NTU), et continue de baisser 30 minutes après (10 NTU).

Malgré ces tentatives de remédiation, le débit d'exploitation du doublet d'Issy-les-Moulineaux reste limité, fin 2019, à une valeur de 40 à 50 m³/h, en raison de l'injectivité insuffisante du puits ILM2.

3.2.4. Enseignements et préconisations relatifs à l'opération d'Issy-les-Moulineaux

Enseignements relatifs à l'exploitation du doublet

Comme pour l'opération des Tours AGF, l'exploitation du doublet d'Issy-les-Moulineaux a été confrontée très rapidement au problème d'injectivité dans les sables de l'Albien.

La dégradation de l'injectivité du puits ILM2 a été attribuée à la venue de particules fines dans le puits producteur ILM1 et, malgré des multiples tentatives de remédiation (restauration du massif filtrant, réfection de la complétion et nettoyage du puits producteur ILM1 et du puits injecteur ILM2), le fonctionnement du doublet reste actuellement fortement impacté (débit très limité).

En plus du défaut majeur lié à la complétion du forage producteur (réserve de graviers insuffisante du massif filtrant), **les architectures des forages d'injection et de production comportent des différences notables :**

- le forage producteur ILM1 est un puits vertical, le réservoir a été foré en diamètre 12''1/4, puis alésé en diamètre 15''. La complétion est constituée d'un liner de diamètre 8''5/8, comportant des sections crépinées (type JOHNSON à fil continu enroulé sur un tube comportant des perforations de 16 mm) et des **tubes pleins positionnés notamment au droit des**

formations des argiles de Tégulines et des argiles de l'Armance. Le calibre du massif filtrant est de 1 à 1,25 mm. La hauteur totale des tubes crépinés est de 54,2 m ;

- le puits d'injection ILM2 est un puits dévié (27° au toit du réservoir), le réservoir a été foré en diamètre 12''1/4 (qui n'a pas été alésé), la complétion du forage est constituée d'un liner comportant une crépine pré-gravillonnée (calibre 1,16 - 1,7 mm), de type JOHNSON MuniPak, à double paroi de diamètre interne 8''5/8 (fil enroulé) et externe 10''5/8 (à nervures repoussées). Les crépines ont été positionnées sur quasiment toute la hauteur de l'Albien (pas de tube plein au droit des niveaux des argiles de Tégulines et de l'Armance). La hauteur crépinée totale est de 104,1 m (soit quasiment le double par rapport au forage ILM1).

Le slot des crépines est de 0,8 mm pour la complétion des deux forages.

Les puits ont été développés par des techniques similaires (soufflage et air-lift), réalisées par phases successives et menées sur une période de l'ordre d'une dizaine de jours. Des essais de pompage ont ensuite été effectués, comprenant des paliers de débits croissants (jusqu'à des valeurs supérieures à 250 m³/h), sans atteindre le débit critique des ouvrages. La productivité des puits était très bonne, avec un indice de l'ordre de 10 m³/h/m. Les interprétations des essais de longue durée (72 heures, au débit moyen de 216 m³/h pour ILM1, et 52 heures, au débit moyen de 244,4 m³/h pour le puits ILM2) ont permis d'évaluer la transmissivité du réservoir, de l'ordre de 6.10⁻³ m²/s.

Les analyses granulométriques réalisées par filtration étagée du fluide produit par le puits ILM1 ont montré que **la taille des particules fines (très majoritairement supérieure à 8 µm, parfois inférieure à 0,2 µm) est inférieure à la maille de filtration en surface (130 µm), ce qui peut expliquer le colmatage rapide du forage ILM2.**

La tentative de régénération du puits ILM2 par la mise en production de ce puits injecteur par air-lift, réalisée récemment en 2019, **ne semble pas avoir amélioré les performances de l'exploitation de manière pérenne**, la dégradation de l'injectivité apparaissant à nouveau rapidement après la remise en service du doublet.

De telles opérations de nettoyage permettent généralement de mobiliser les particules fines incrustées dans la porosité du réservoir dans un rayon proche du puits (cf. section 5.3.4). Dans le cas de l'opération d'Issy-les-Moulineaux, **il est possible que les particules aient migré plus loin dans le réservoir et ne soient donc plus mobilisables via ce type d'action hydromécanique.**

Les flowmétries réalisées dans le puits ILM2, en 2012 (en production) et en 2019 (en injection), à des débits différents (respectivement 73 et 35 à 40 m³/h), semblent montrer une dissymétrie des écoulements au niveau du réservoir. Des niveaux affectés par un colmatage des crépines et/ou du proche réservoir contribuent plus ou moins à l'écoulement.

D'autre part, la vitesse d'entrée du fluide dans les crépines du puits ILM2 peut être évaluée à 0,69 cm/s, en considérant le débit maximum connu pour ce puits injecteur mis en production, lors de la phase de développement (251 m³/h), les caractéristiques techniques des crépines (diamètre extérieur de 254 mm et ouverture de 8 %, d'après les données du fabricant) et la hauteur utile de l'écoulement, d'après la flowmétrie réalisée en production (95,1 m). Cette valeur est théorique, car le débit est réparti sur toute la hauteur de la section crépinée, ce qui ne correspond pas à la réalité, la contribution au débit est sensiblement différente suivant les niveaux producteurs. La vitesse d'entrée du fluide n'a pas pu être estimée dans le puits ILM1, à cause du manque d'information sur le taux d'ouverture des crépines utilisés dans l'ouvrage.

Néanmoins, cette vitesse moyenne est inférieure à la valeur limite de 1 cm/s définie d'après les bonnes pratiques (Solages, 1979 ; Ungemach, 2003). Elle permet, théoriquement, d'éviter un écoulement turbulent du fluide, à l'interface entre la formation aquifère et les crépines, pouvant provoquer une déstabilisation du proche réservoir par la mobilisation des particules fines.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des faits marquants de l'exploitation géothermique d'Issy-les-Moulineaux, depuis les premières phases d'essai du doublet réalisées en 2011 et 2012.

<p>2011 : Observation d'une anomalie liée à la venue importante de particules fines par l'espace annulaire de la complétion du puits producteur ILM1, lors des essais de production.</p> <p>2012 : Réalisation de plusieurs essais d'injection sur ILM2 et restauration du massif filtrant du puits ILM1 (complément de graviers dans l'annulaire de la colonne de captage) et essai de pompage avec inspection par caméra vidéo pour contrôler la venue des particules fines.</p> <p>2014 : Mesures de turbidité des forages en production (taille des particules fines inférieure à 80 µm) et nouvelle inspection du puits producteur ILM1.</p> <p>→ Identification des venues de particules au sommet du <i>liner-hanger</i> de ILM1 à cause de l'absence de graviers dans la partie sommitale de la colonne de production provoquant le colmatage du puits ILM2</p> <p>2015 : Travaux de réfection de la complétion du puits producteur ILM1 (mise en place d'une colonne d'extension de 30 mètres au-dessus du <i>liner hanger</i> et contrôle du positionnement du gravier par diagraphie) et développement du forage.</p> <p>2016 : Déclaration de sinistre pour le puits ILM1.</p> <p>2018/2019 : Filtration étagée et inspection vidéo du puits ILM1 et essai de flowmétrie sur le puits ILM2. Nettoyage du puits ILM1 et du puits ILM2 par mise en production assistée par air-lift.</p> <p>Fin 2019 : Exploitation du doublet à un débit limité de 40 à 50 m³/h.</p>

Tableau 10 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet d'Issy-les-Moulineaux.

Préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Compte-tenu de l'ensemble des investigations menées et des résultats obtenus, depuis sa mise en service en 2013, les préconisations relatives à l'exploitation du doublet d'Issy-les-Moulineaux portent sur les propositions suivantes :

- l'adaptation des équipements de surface de la boucle géothermale pourrait être envisagée pour limiter le passage des particules fines provenant du puits producteur ILM1 (à l'origine de la dégradation de l'injectivité du puits ILM2). La taille des mailles des filtres pourrait être réduite, si possible à 1 µm ;
- de nouveaux traitements du réservoir (injection d'hexa-méta-phosphates, par exemple) pourraient être mis en œuvre pour tenter d'améliorer l'injectivité du puits ILM2, en cherchant à détruire les particules fines accumulées potentiellement à une certaine distance du puits ;
- des flowmétries en production et en injection, au même débit (d'exploitation si possible), permettraient de mieux caractériser le fonctionnement du puits ILM2 au niveau du réservoir selon le sens d'écoulement. Ceci permettrait de vérifier l'existence d'une potentielle dissymétrie, qui pourrait expliquer des difficultés supplémentaires à l'injection (réduction

potentielle de la section d'écoulement), et une éventuelle déstabilisation du réservoir, lorsque ce puits est mis en production (profil de vitesses réelles). Une flowmétrie du puits ILM1, au débit d'exploitation, permettrait également d'identifier éventuellement, la ou les sections où la vitesse réelle du fluide dépasse la valeur critique de 1 cm/s, et donc de possibles entrées localisées de particules.

3.3. OPÉRATION DU PLESSIS-ROBINSON (NÉOCOMIEN) MISE EN SERVICE EN 2013

3.3.1. Contexte et problématique de l'opération

Comme pour l'opération précédente d'Issy-les-Moulineaux, le doublet géothermique du Plessis-Robinson (92) a été mis en service en 2013. Il s'agit de la première (et à ce jour, la seule) opération ciblant les niveaux sableux du Néocomien.

Le débit prévisionnel d'exploitation était de 200 m³/h, pour une puissance visée du dispositif avec PAC de 5,3 MW et une part d'énergie renouvelable de 55 %. La température de production, lors de la mise service en 2013 était de 38 °C et la température de réinjection était de 15 °C.

Après une phase d'arrêt en 2017 et 2018 due au colmatage répété du puits injecteur LPR2, les travaux entrepris en juin 2019 ont permis de relancer l'exploitation en fin d'année 2019, à un débit limité à 110 m³/h.

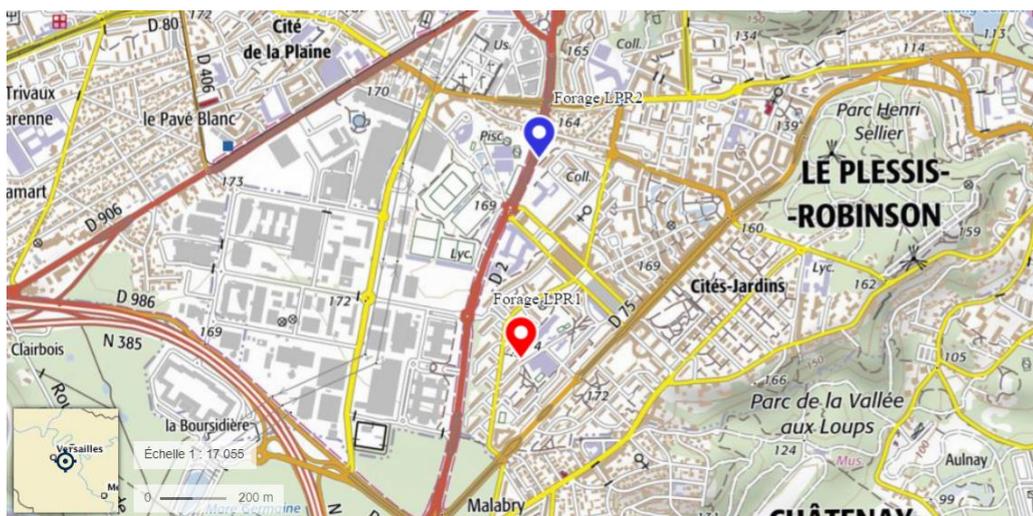


Figure 25 : Localisation du forage producteur LPR1 et du forage injecteur LPR2 du doublet géothermique du Plessis-Robinson (92).

3.3.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération

Réalisés en 2012, les travaux de forage du puits de production LPR1 ont duré 53 jours. Ils ont été menés de façon discontinue (interruption la nuit et le week-end) et ont été retardés par des intempéries. Les travaux de forage du puits injecteur LPR2 ont duré 46 jours.

Le puits producteur LPR1 est un forage vertical de 991 m de profondeur. Il a atteint le toit du réservoir à 846 m et l'a traversé sur une épaisseur de 144 m. Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 16" (de 0 à 374,5 m) et 10"3/4 (descendu jusqu'à 888 m). Ce dernier a été coupé à la profondeur de 332 m pour l'aménagement de la chambre de pompage. **Le réservoir a été foré en diamètre 9"1/2, puis alésé en 15"**.

La colonne de captage (liner) comprend une crépine en acier inoxydable (304L) de diamètre 7''5/8 (194 mm), de type JOHNSON, constituée par un **fil continu enroulé sur un tube comportant des perforations de 16 mm. Le slot des crépines est de 0,75 mm** et le massif filtrant est constitué par un **gravier de granulométrie de 0,8 à 1,4 mm. Deux sections de tubes pleins sont intercalées dans la colonne.** La hauteur totale crépinée est de 72,1 m. La colonne se termine par un tube décanteur fermé par un fond plat.

La coupe géologique et technique du forage producteur LPR1 est présentée en Figure 26.

Le **puits injecteur LPR2 est un forage dévié** de 1040 m de profondeur (forée). Il a traversé le réservoir de 889 à 1021 m de profondeur (soit sur une longueur forée de 132 m). La déviation (initiée à la profondeur de 263 m) a permis d'obtenir un déplacement horizontal de 260 m vers le nord (inclinaison proche de 30° et azimuth 0,26°, au toit du réservoir). L'écartement des impacts au réservoir des puits LPR2 et LPR1 est de 685 m. Le forage est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 16'' (de 0 à 236,6 m) et 10''3/4 (de 182 à 906,8 m). **Le réservoir a été foré en diamètre 9''1/2, puis alésé en 11''.**

La colonne de captage (liner) est équipée d'une crépine en acier inoxydable (304L), de type JOHNSON MUNI-PAK, constituée par une **double paroi de diamètres 6''5/8 (à fil enroulé) et 8''5/8 (à nervures repoussées). Le slot des crépines est de 1 mm** et l'espace interne des crépines est rempli par des billes de verre de **calibre de 1,25 à 1,65 mm**. La colonne crépinée est interrompue par plusieurs (4) sections de tubes plein. La hauteur totale crépinée est de 86 m. La colonne se termine par un tube décanteur fermé par un fond plat.

La coupe géologique et technique du forage injecteur LPR2 est présentée en Figure 27.

NB : Lors de la mise en place de la colonne captante, le *liner hanger* n'a pas pu être verrouillé. Après la mise en eau du forage, un massif filtrant de graviers complémentaire (calibre 2,5 - 5 mm) et un second obturateur (packer seal) ont été mis en place.

La filtration en surface se fait grâce à 3 filtres cycloniques de maille 100 µm.

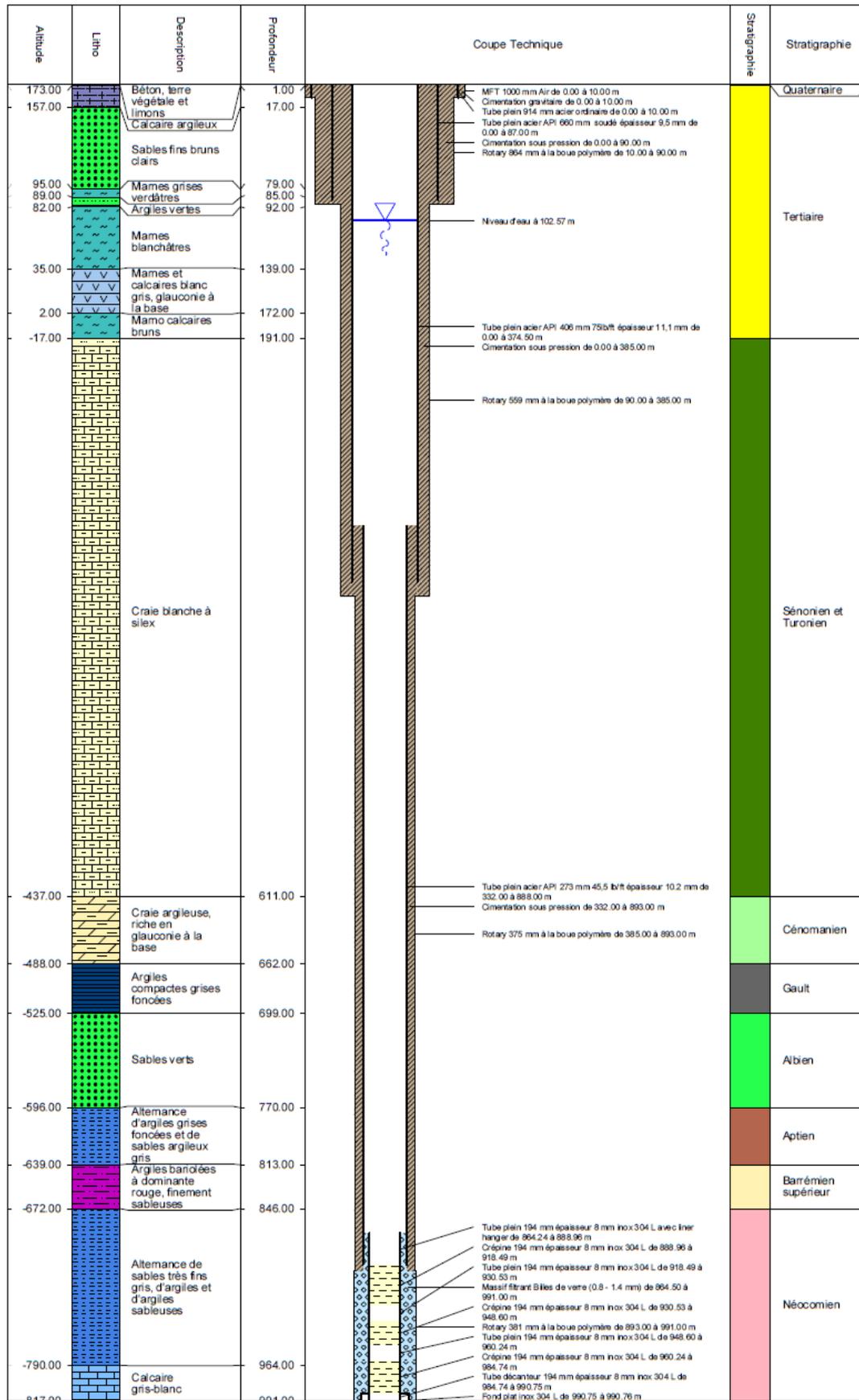


Figure 26 : Coupe géologique et technique du forage de production LRP1 (d'après DOE).

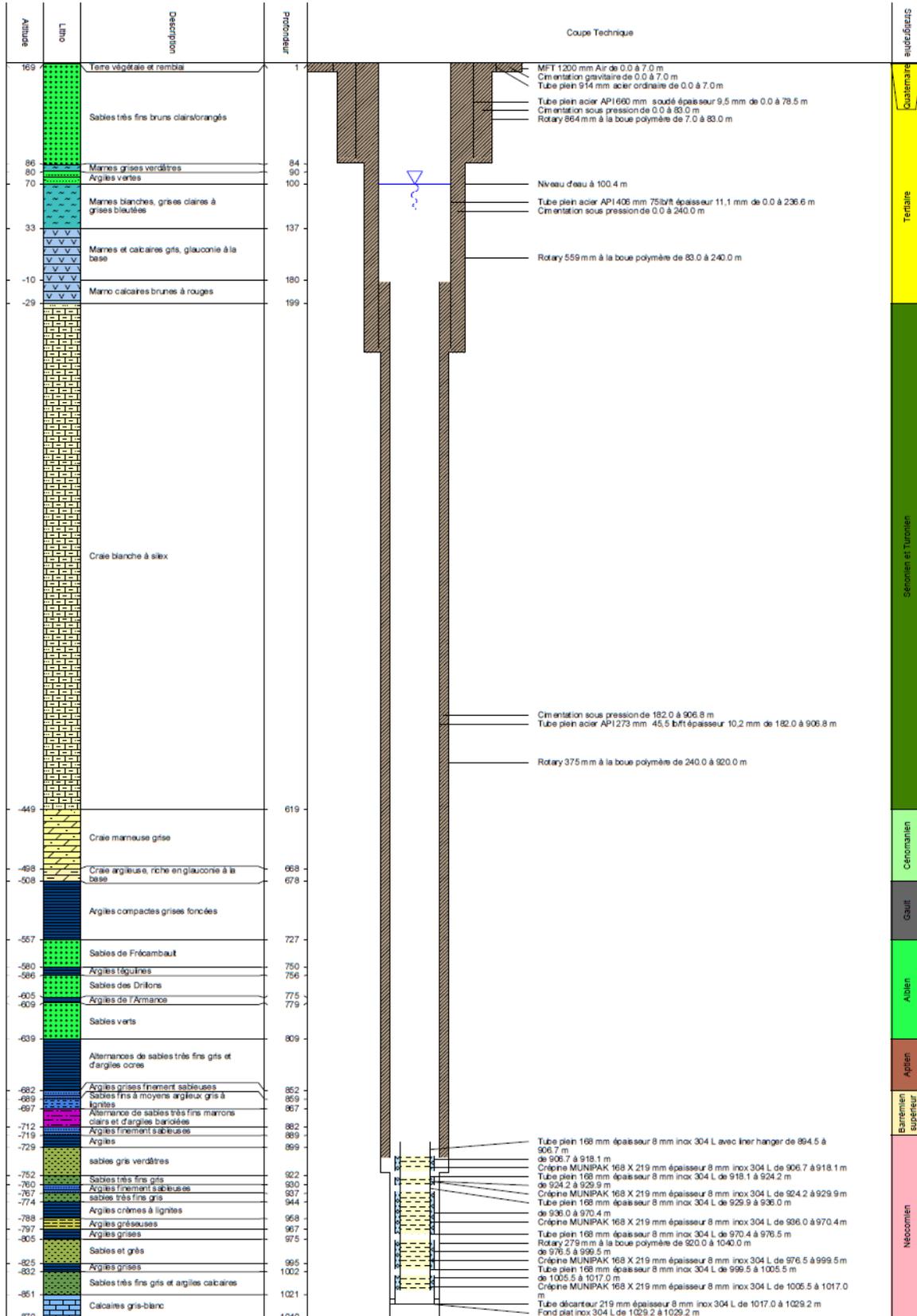


Figure 27 : Coupe géologique et technique du forage d'injection LRP2 (d'après DOE).

En ce qui concerne les phases de développement et d'essais des puits du doublet du Plessis-Robinson, l'analyse des opérations fait apparaître les éléments synthétisés ci-dessous.

La première phase de traitement (hexa-méta-phosphates) et de **développement du forage producteur LPR1** (mars et avril 2012) a été réalisée par air-lift et pistonnage durant 9 jours, jusqu'à un débit stabilisé de 120 m³/h. Il a été suivi par un nouveau pompage de 3 jours, puis un premier essai de production par paliers (4 paliers de 2 heures). Le débit maximum enregistré était de 170 m³/h et l'indice de productivité était de 3,3 m³/h/m. Le pompage de longue durée a été interrompu en raison d'une panne de la pompe immergée.

La deuxième phase traitement (hexa-méta-phosphates) et de développement du puits par air-lift (mai 2012) a été réalisée, suite à des inspections de l'ouvrage (vidéo et cimentation complémentaire du tubage 10"3/4) et a comporté des diagraphies de production (flowmétrie).

Au cours de la troisième phase de développement du puits par air-lift (août 2012), le débit maximum a été enregistré à 240 m³/h (les pertes de charges quadratiques estimées à 33 % du rabattement mesurées ont montré que **le débit critique du puits n'a pas été atteint**). Les essais par paliers (4 paliers de 2 heures à débits croissants, entre 80 et 200 m³/h, entrecoupés par une remontée de pression) ont donné un indice de productivité de 3,5 m³/h/m. La teneur en sable dans le fluide produit était inférieure à 0,1/1 000.

L'interprétation des **essais de longue durée (72 heures)**, réalisés au débit moyen de 185 m³/h, a permis de déterminer la transmissivité du réservoir ($2,53 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour la descente, $1,32 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour la remontée) et **l'indice de productivité du puits était alors évalué à 3 m³/h/m**. La température, en tête de puits, était mesurée à 38,6 °C.

Après une première phase de **développement du forage injecteur LPR2** par air-lift (juin 2012) et de contrôle de l'ouvrage (inspection vidéo et cimentation complémentaire), la deuxième phase de traitement (hexa-méta-phosphates) et de développement du puits a été réalisée par air-lift et soufflage (juillet 2012) sur une dizaine de jours. Les essais par paliers (4 paliers de 2 heures) ont donné un indice de productivité de 3,3 m³/h/m, avec un débit maximum enregistré à 200 m³/h.

L'interprétation des **essais de longue durée (72 heures)**, au débit moyen de 187 m³/h, a permis de déterminer la transmissivité du réservoir ($3,44 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour la descente, $1,11 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour la remontée). **L'indice de productivité du puits était alors de 3 m³/h/m également.**

Des tests d'injection ont ensuite été réalisés (septembre 2012) comprenant des phases d'injection et de production par paliers. Ces essais ont montré une bonne injectivité du forage évaluée à 4,1 m³/h/m pour un débit de 202 m³/h. Les indices de productivité des deux forages étaient similaires (proches de 3,5 m³/h/m).

Le Tableau 11 et la Figure 28, ci-dessous, résument l'évolution des indices d'injectivité et de productivité des forages.

Mesure au puits	Date	Durée du test	Pression injection (bars)	Débit inj. max (m ³ /h)	II (m ³ /h/m)	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
LPR1	03/2012	9 jours				170		Développement air lift et hexametaphosphate
	04/2012	4 x 2h				170	3,3	Développement (1er essai par paliers)
	08/2012	2 jours				240		Développement air lift
	08/2012	4 x 2h				197	3,5	Développement (2eme essai par paliers)
	09/2012	72h				185	3,0	Essai longue durée
LPR2	07/2012	10 jours				195		Développement air lift, soufflage et hexametap.
	07/2012	4 x 2h				200	3,3	Développement (essai par paliers)
	08/2012	72h				187	3	Essai longue durée
	09/2012	1h30, 3h, 2h et 65h30	/	182,0	4,1	202	3,4	Essai de pompage et réinjection (par paliers)
	09/2012				3,7	175,6		Essai avec remontée en pression

Tableau 11 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (LPR1) et d'injection (LPR2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet du Plessis-Robinson, en 2012.

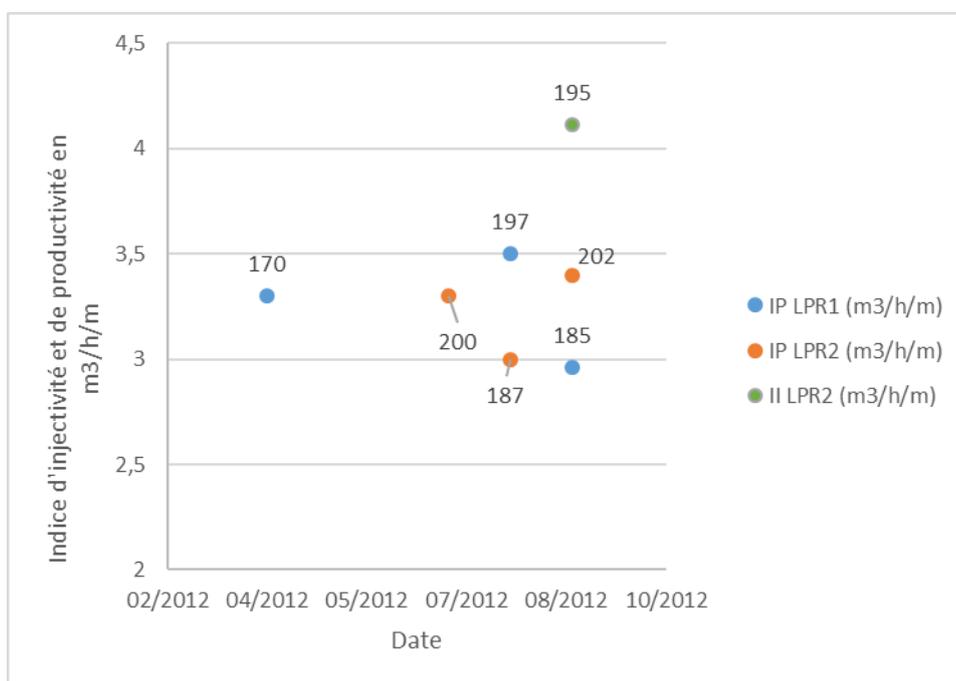


Figure 28 : Évolution des indices de productivité (IP) et d'injectivité (II) des puits de production (LPR1) et d'injection (LPR2) relevés au cours des différents essais réalisés sur le doublet du Plessis-Robinson, en 2012 (étiquette des données : débit en m³/h).

L'ensemble des données décrites ci-dessus sont synthétisées dans les deux tableaux suivants.

Opération	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur totale (md)	Fonction	Profil	Tubages	Diamètre forage du réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)	Longueur forée réservoir (mD)
Plessis-Robinson (92)	LPR1	2012 53 jours (5 j / 7)	991	producteur	vertical	acier 16" (0 à 374,5 m) et 10"3/4 (332 à 888 m)	trou 9"1/2 alésé 15"	crépine inox 304 L 7"5/8 (type JOHNSON à fil continu enroulé sur tube avec perforations de 16 mm, gravier de calibre 0,8 à 1,4 mm) + tubes pleins	0,75	72,1	144
	LPR2	2012 46 jours (5 j / 7)	1040	injecteur	dévié à 263m (incl. 30°, Az 0,26°)	acier 16" (0 à 236,6 m) et 10"3/4 (182 à 906,8 m)	trou 9"1/2 alésé 11"	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK 6"5/8 x 8"5/8 (billes de verre : calibre 1,25 à 1,65 mm) + tubes pleins	1	86	132

Tableau 12 : Conception des forages du doublet du Plessis-Robinson (92).

Forage	Épaisseur de sables propres (m)	Traitement / Développement	Niveau statique (m/sol)	Débit max dvlpt. (m ³ /h)	Productivité après développement (m ³ /h/m)	Durée essai (h)	Débit essai (m ³ /h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Indice de productivité, injectivité (m ³ /h/m)
LPR1	27,2	air-lift + pistonage (9 jours) + essai par paliers	101	240	3,5	72	185	62,5	2,53.10 ⁻³ (descente) 1,32.10 ⁻³ (remontée)	2,96
LPR2	71,6	air-lift + soufflage (10 jours) + essai par paliers	99,65	200 (prod) et 182 (inj)	3,3	72	187	62,3	3,44.10 ⁻³ (descente) 1,1.10 ⁻³ (remontée)	3 (IP) et 3,7 (II)

Tableau 13 : Caractérisation initiale du Néocomien au droit du doublet du Plessis-Robinson (92).

Les analyses granulométriques réalisées sur les *cuttings* des formations sableuses du Néocomien indiquent une composition majoritaire de sables fins à moyens, localement grossiers. La fraction la plus fine, inférieure à 0,08 mm, varie très fortement pour les échantillons analysés (entre 8 et 75 %, au niveau du forage LPR2).

Les diagraphies de réservoir ont permis d'identifier cinq grands ensembles à dominantes sableuses ou argileuses et de positionner les crépines et tubes pleins, en conséquence.

Les diagraphies de production du forage producteur LPR 1 réalisé au débit (faible) de 47,5 m³/h ont montré que les niveaux sableux intermédiaires, entre 934,3 et 947 m de profondeur, représentaient la contribution principale (environ 88 %) du débit testé. Les autres niveaux producteurs se trouvaient entre 902 et 910 m (5 % du débit total testé), entre 960 et 965 m (4 %) et entre 915 et 918 m (3 %). L'épaisseur utile de réservoir sur le puits LPR1 est estimée à 27,2 m pour une épaisseur totale de 144 m.

Au niveau du forage LPR2, au débit de 72 m³/h, la contribution principale correspond à l'intervalle compris entre 984,5 et 994,5 m (65 % du débit), les autres niveaux producteurs étant ensuite davantage répartis sur la hauteur du réservoir, avec des contributions variables. L'épaisseur utile du réservoir, au niveau du forage LPR2, est donc plus importante que sur le forage LPR1 avec 71,6 m (NB : les débits testés en diagraphie de production ne sont pas similaires d'un test à l'autre : 47,5 m³/h pour LPR 1, contre 72 m³/h pour LPR 2).

Les analyses physico-chimiques du fluide, effectuées au cours des essais de production ont montré une eau de type bicarbonaté calcique et magnésien, faiblement minéralisée (environ 450 µS/cm) et dépourvue en oxygène dissous. Elles ont, d'autre part, révélé la présence de fer dissous (210 µg/L pour LPR1 et 130 µg/L pour LPR2) et des traces de manganèse (26 à 27 µg/L). Le pH était autour de 7,6.

Sur le plan bactériologique, les analyses ont montré l'absence de germes pathogènes et la présence de bactéries sulfato-réductrices, dont l'origine est probablement due aux travaux.

La température du fluide était de 37,5 °C.

3.3.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation

Le doublet du Plessis-Robinson a été mis en service en mars 2013. Après un peu plus de 3 ans de fonctionnement, une dégradation de l'injectivité est survenue sur le forage LPR2. Elle a été attribuée à la production de particules fines produites par le forage LPR1 et au colmatage progressif du puits LPR2.

Différents suivis, diagnostics et travaux ont été entrepris sur les ouvrages, afin de définir l'origine des dégradations du doublet et restaurer le fonctionnement de l'exploitation.

L'historique des investigations est développé dans les paragraphes ci-dessous.

Début de l'exploitation du doublet marqué par la venue de particules fines métalliques (2013 à 2014)

Fin 2013, après quelques mois d'exploitation, le dispositif fonctionnait au débit prévisionnel de 200 m³/h et les niveaux dynamiques étaient stables. Les valeurs de productivité et d'injectivité étaient similaires pour les deux puits (autour de 3 m³/h/m). Le niveau statique se situait à une

valeur proche de 100 m sous le niveau du sol et le niveau dynamique était mesuré à 35 m de profondeur, dans le forage d'injection LPR2 (réinjection gravitaire).

En surface, la boucle géothermale était équipée de 3 filtres cycloniques de maille 100 µm. Fin 2013, la fréquence de nettoyage des filtres aurait augmenté, suite à la venue de particules fines métalliques dont l'origine n'a pas été clairement identifiée. Elles pourraient provenir de modifications physico-chimiques du fluide, liées à différents phénomènes plus ou moins combinés (érosion au niveau du réservoir, abrasion / corrosion des équipements du puits de production, précipitations chimiques...). Des pièges métalliques ont été mis en place au niveau des filtres, en 2014.

Comblement et nettoyage du puits injecteur LPR2 (2015 à 2016)

Le suivi d'exploitation a montré une évolution du niveau dynamique dans le forage injecteur LPR2, passant d'environ 40 m/sol en 2015, à environ 20 m/sol en mars 2016.

En août 2016, l'inspection par caméra vidéo a montré que le fond du puits LPR 2 était comblé sur une hauteur de 58 m supérieure à celle du tube décanteur (ou « poubelle » entre 1017 et 1029 m), masquant 40 % de la hauteur crépinée dans la partie basse du puits (la section crépinée au-dessus apparaissant propre).

Le nettoyage du puits a été réalisé par curage et soufflage, à un débit maximal de 126 m³/h (limité par le débit d'air injecté), durant environ 14 heures (septembre 2016), avec mesure de la turbidité du fluide produit. Un important volume de sable (fin) a été récupéré en surface (2773 m³ au total), avec une **proportion de particules passant au tamis de 80 µm évaluée entre 35 et 47 %**.

L'inspection finale du puits par caméra vidéo a confirmé le nettoyage des crépines et la présence des billes de verres à l'intérieur de la crépine à double paroi, jusqu'à 1014 m de profondeur (obstruction du puits par une pièce en caoutchouc).

La remise en exploitation du doublet a montré que les débits spécifiques initiaux en injection n'ont pas été retrouvés, après cette opération. Il est possible que le développement du forage ait déstabilisé le réservoir dans un rayon proche du puits, provoquant une production très importante de particules fines à l'origine du comblement de la partie basse de l'ouvrage.

Suivi des ouvrages, intervention sur le forage LPR2 (2017)

En 2017, une augmentation continue du niveau dynamique dans le forage injecteur LPR2 a été de nouveau constatée, malgré la réduction progressive du débit injecté.

Le niveau dynamique dans le forage de production LPR1 a, par contre, peu évolué, depuis la mise en service du doublet, de même que les paramètres physico-chimiques du fluide. Seule la température du fluide a semblé montrer une baisse très importante, au niveau des deux forages (38,9 °C en 2012, et 36,5 °C en 2017 pour LPR1 ; 39 °C en 2012, et 33 °C en 2017 pour LPR2), pouvant être expliquée par des conditions de mesures différentes (mesures en tête de puits ou en fond de puits, débit de production, comblement de la partie basse du puits injecteur).

Une nouvelle inspection vidéo du forage LPR2 (juin 2017) a montré que les sections crépinées les plus basses étaient, à nouveau, masquées (présence de dépôts visibles dans les interstices du massif filtrant, dépôts meubles et grossiers obstruant les ouvertures des crépines).

Une nouvelle opération de nettoyage du forage a alors été réalisée par soufflage (septembre 2017). La proportion de particules sableuses de taille inférieure à 80 µm (2,7 %) remontées en

surface était alors très inférieure à celle constatée, lors de l'opération précédente de 2016 (pour rappel : 35 à 47 %).

Le forage LPR2 a ensuite été développé par air-lift (septembre et octobre 2017) jusqu'à un débit de 200 m³/h, puis par traitement chimique au poly-phosphate et curage du fond de l'ouvrage. Une importante quantité de sables a, de nouveau, été produite en surface, avec une proportion de particules de taille inférieure à 100 µm (taille des filtres cycloniques en surface) d'environ 7 %. Suite à cette opération, la productivité de l'ouvrage est passée de 2,3 à 3,16 m³/h/m.

L'inspection finale du puits par caméra vidéo a, de nouveau, révélé la présence de sables en fond de puits, à partir de 997,5 m de profondeur (soit un comblement d'une quarantaine de mètres).

Le doublet a ensuite été remis en exploitation le 15 novembre 2017. Après 48 heures de fonctionnement, le niveau dynamique, dans le puits d'injection, a brusquement augmenté et a conduit l'exploitant à réduire le débit à 150 m³/h (fin novembre 2017), puis à 110 m³/h (mi-décembre 2017). L'exploitation a été mise à l'arrêt en janvier 2018. L'injectivité du puits LPR2 avait alors diminué de 2,5 à 1,24 m³/h/m en moins d'un mois.

Inspection des forages LPR2 et LPR1 (janvier 2018)

En janvier 2018, une nouvelle inspection vidéo du puits LPR2 et une flowmétrerie réalisée en injection (au débit maximum de 99 m³/h) ont révélé la présence de nombreux dépôts très fins (*a priori* argileux), blanchâtres, sur plusieurs sections crépinées. Le massif filtrant n'était plus visible localement et les niveaux producteurs ont semblé différents par rapport aux résultats de 2012, dans la limite d'interprétation liée aux conditions différentes des tests : en 2012 (débit de 72 m³/h en production), la partie basse de l'ouvrage (entre 988 et 1015 m) contribuait pour 54 % du débit ; cette section ne représenterait plus que 18 % en 2018 (débit en injection de 99 m³/h). La hauteur productrice, évaluée à 71 m en 2012, ne serait plus que de 32 m en 2018.

Le forage producteur LPR1 n'a pas semblé être la cause du problème (rabattement normal, filtres propres). Un contrôle du fluide effectué au niveau d'un piquage, en tête du puits injecteur LPR2, a montré l'absence de turbidité, avant sa réinjection.

Nettoyage du forage LPR2 et remise en exploitation (avril 2019)

Suite à ce diagnostic, une nouvelle opération a été réalisée (avril 2019), comprenant le curage du puits et le brossage des crépines, un nettoyage du puits par air-lift (débit progressif de 7 à 80 m³/h), le contrôle des cimentations des tubages et une inspection vidéo de l'ouvrage.

Au cours de la phase de nettoyage, l'aspect de l'eau a été contrôlé entre chaque paliers de débit : la turbidité du fluide a semblé décroître après le démarrage de l'air-lift (aucune mesure quantitative n'a été reportée). L'indice de productivité de l'ouvrage a été évalué entre 3 et 3,3 m³/h/m pour un débit d'exhaure de 75 à 80 m³/h (valeurs similaires à celles mesurées en 2012, suite au développement initial de l'ouvrage).

L'inspection finale du puits par caméra vidéo a montré des crépines partiellement obstruées localement, mais globalement propres. Le fond du forage a été mesuré à 1 024,3 m (soit à un peu moins de 5 m de la base du tube décanteur disposé à 1 029 m).

Le doublet a été remis en exploitation au débit limité de 110 m³/h, en fin d'année 2019.

3.3.4. Enseignements et préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Enseignements relatifs à l'exploitation du doublet

Comme pour l'opération d'Issy-les-Moulineaux, il est probable que l'origine de la dégradation de l'injectivité du puits LPR2 (injecteur du doublet du Plessis-Robinson) soit liée initialement à la venue de particules fines provenant du puits producteur LPR1. Par la suite, les opérations de nettoyage du puits LPR2 ont pu aggraver l'état de ce puits par la déstabilisation du proche réservoir.

D'un point de vue architectural, les complétions des doublets géothermiques des opérations d'Issy-les-Moulineaux et du Plessis-Robinson, captant des réservoirs sableux distincts (respectivement l'Albien et le Néocomien), ont globalement été conçues avec des équipements similaires :

- les puits producteurs sont verticaux et les puits injecteurs sont déviés ;
- les complétions des puits producteurs comprennent des crépines de diamètre 7''5/8, constituées par un fil continu enroulé sur un tube perforé par des trous de 16 mm de diamètre ; celles des puits injecteurs correspondent à une crépine à double paroi (de diamètres différents) avec un fil enroulé pour la paroi interne et à nervures repoussées pour la paroi externe ;
- les calibres de graviers constituant les massifs filtrants sont sensiblement les mêmes, globalement compris entre 0,8 et 1,7 mm.

Cependant, l'analyse détaillée des équipements fait apparaître les différences notables suivantes :

- les réservoirs ont été alésés en diamètre 15'' au niveau des puits producteurs, alors que, pour les puits injecteurs, le forage d'Issy-les-Moulineaux (ILM 2) a été foré en diamètre 12''1/4 et n'a pas été alésé, et le forage du Plessis-Robinson a été foré en diamètre 9''1/2 puis alésé en 11'' ;
- les diamètres des crépines à double paroi du puits injecteur LPR2 du doublet du Plessis-Robinson (6''5/8 et 8''5/8) sont inférieurs à ceux du puits injecteur ILM2 d'Issy-les-Moulineaux (8''5/8 et 10''5/8) ;
- l'ouverture des crépines (slot) est de 0,8 mm pour les puits du doublet d'Issy-les-Moulineaux ; il est de 0,75 mm pour le puits producteur LPR1 et de 1 mm pour le puits injecteur LPR2 ;
- la colonne captante du forage injecteur LPR 2 ne comporte pas de tubes pleins (au droit des niveaux argileux), contrairement à la complétion des 3 autres forages.

D'un point de vue général, les différences constatées pour ces deux doublets se retrouvent également dans la comparaison des complétions équipant les forages du doublet des Tours AGF. En plus des problèmes techniques particuliers (par exemple : entrée d'air dans la boucle géothermale du doublet des tours AGF, défaut du massif filtrant du puits producteur du doublet d'Issy-les-Moulineaux...), ces différences architecturales ajoutent une difficulté supplémentaire pour la compréhension globale des phénomènes et l'identification des causes majeures de la dégradation de l'injectivité, qui reste le principal problème de ces exploitations.

À ce stade de l'étude, il apparaît donc essentiel, pour l'amélioration des pratiques et l'optimisation des chances de succès relatives à la réalisation de nouveaux projets ciblant des réservoirs sableux, de définir une même architecture de forages (profil des puits) et de complétions, qui permettrait de faire fonctionner le doublet dans le sens le plus favorable pour l'exploitation (voir recommandations au chapitre 5).

Il est, d'autre part, indispensable de mettre en place des complétions au plus grand diamètre possible (pour réduire les pertes de charge et diminuer la vitesse d'entrée du fluide dans les crépines), comportant systématiquement des tubes pleins au droit des sections argileuses, et de réduire, le plus possible, l'ouverture des crépines et la taille des filtres en surface.

D'un point de vue particulier, le type de crépines utilisé pour la complétion des puits producteurs d'Issy-les-Moulineaux et du Plessis-Robinson (fil enroulé sur un tube perforé par des trous de 16 mm de diamètre) ne paraît pas être le mieux adapté pour limiter le passage des particules fines vers le puits injecteur. Les perforations dans le tube de la colonne captante, notamment, ont probablement pour effet de concentrer le débit sur des sections restreintes, accélérant localement la vitesse d'écoulement du fluide à l'entrée de la crépine et favorisant, par conséquent, la mobilisation des particules fines dans le proche réservoir.

De même, le type de crépines utilisé pour la complétion des puits injecteurs est probablement une des causes d'aggravation de la situation, lorsque ces puits sont mis en production (opérations de développement, nettoyage, rétro-lavage). Les nervures repoussées de la paroi externe pourraient provoquer un dégazage du fluide (hypothèse émise pour l'opération des Tours AGF) et l'ouverture des crépines est probablement trop importante, notamment pour le forage LPR2 (slot de 1 mm), compte-tenu de la taille des particules fines (volume très important de sable produit, lors de l'opération de nettoyage de 2016, avec 35 à 47 % de particules de taille inférieure à 80 μm).

Les opérations de nettoyage successives du puits LPR2 ont ainsi pu aggraver l'état de ce puits par la déstabilisation du proche réservoir.

La vitesse d'entrée du fluide dans les crépines du puits LPR2 peut être évaluée à 0,81 cm/s, en considérant le débit maximum connu pour ce puits injecteur mis en production, lors de la phase de développement (200 m³/h), les caractéristiques techniques des crépines (diamètre extérieur de 219,1 mm et ouverture de 8,4 % d'après les données du fabricant) et la hauteur utile de l'écoulement, d'après la flowmétrie réalisée en production (71,6 m). Cette valeur théorique (pour rappel : le débit est réparti sur la hauteur utile à l'écoulement estimé par flowmétrie à un débit inférieur au débit maximal envisagé) est inférieure à la valeur limite de 1 cm/s définie d'après les bonnes pratiques (Solages, 1979 ; Ungemach, 2003).

Pour le puits producteur LPR1 cette vitesse moyenne est de 1,34 cm/s, en considérant le débit maximum connu pour ce puits, lors de la phase de développement (240 m³/h), les caractéristiques techniques des crépines (diamètre extérieur de 193,7 mm et ouverture de 18 %, d'après les données du fabricant) et la hauteur utile de l'écoulement d'après la flowmétrie réalisée en production (27,2 m).

Des flowmétries réalisées dans les puits au débit d'exploitation permettraient de connaître les profils de vitesse réels.

Le tableau ci-dessous synthétise les faits marquants de l'exploitation du doublet du Plessis-Robinson, depuis les premières phases de développement des forages, en 2012.

2012 : Développement des forages LPR1 et LPR2.

2013 : Mise en service du doublet. Fonctionnement à débit nominal de 200 m³/h. Niveaux statiques stables. Présence de particules métalliques en surface (origine non connue).

2014 : Mise en place de pièges métalliques au niveau des filtres.

2016 : Comblement du puits injecteur LPR2 obstruant 40 % de la hauteur crépinée. Curage et nouveau développement du forage par air-lift.

2017/2018 : Augmentation du niveau dynamique dans le puits LPR2 (pas de variation au niveau de LPR1).

- Juin 2017 : Inspection vidéo de LPR2 (dépôts visibles sur les crépines inférieures, comblement du puits sur 9,4 m).
- Sept-oct 2017 : Nettoyage par soufflage et traitement (poly-phosphates). Un volume important de sable extrait (7% des particules de taille inférieure à 100 µm). Inspection vidéo (comblement à partir de 997,5 m).
- Nov-déc 2017 : Remise en exploitation à débit 150, puis 110 m³/h. Signe de baisse d'injectivité, après seulement 48 h de production.
- Jan 2018 : Arrêt complet de l'exploitation. Diagnostic et diagraphie de production (hauteur utile à l'écoulement réduite de 71 à 32 m, entre 2012 et 2018).

2019 : Nettoyage du forage LPR2 par curage et air-lift jusqu'à 80 m³/h. Restauration de l'indice de productivité (3 m³/h/m). Fonctionnement sur période de chauffe 2019, à débit limité à 110 m³/h.

Tableau 14 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet du Plessis-Robinson.

Préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Comme pour l'opération d'Issy-les-Moulineaux, il apparaît nécessaire, pour maintenir le régime d'exploitation du doublet du Plessis-Robinson, de réduire la taille des filtres en surface (si possible à 1 µm) afin de limiter le passage des particules fines provenant du puits producteur LPR1.

De même, il semble utile de procéder à des flowmétries dans les deux puits (au débit d'exploitation, si possible), afin de mieux caractériser les écoulements au niveau du réservoir et d'identifier, éventuellement, la ou les sections où la vitesse réelle du fluide dépasse la valeur critique de 1 cm/s, et donc les entrées localisées de particules fines.

Compte-tenu des multiples opérations de nettoyage du puits injecteur LPR2 et de leurs résultats, il convient d'adapter les procédures de mise en production pour éviter l'endommagement irrémédiable de l'ouvrage et définir les moyens de procéder à un rétro-lavage le plus efficace possible.

3.4. OPÉRATION DE CLICHY-BATIGNOLLES (ALBIEN) MISE EN SERVICE EN 2016

3.4.1. Contexte et problématique de l'opération

L'opération géothermique de la ZAC Clichy-Batignolles (75) exploite les niveaux sableux de l'Albien par l'intermédiaire de 3 pompes à chaleur centralisées.

Le doublet a été mis en service en 2016, au débit d'exploitation de 180 m³/h, avec des températures de production de 27 °C et de réinjection de 10 °C, soit une puissance géothermale d'environ 3,5 MW. Le taux de couverture par la géothermie est de 83 % pour cette opération.

À partir de janvier 2017, une augmentation de la pression d'injection a été observée, mais elle semble avoir été contrôlée grâce au diagnostic et au programme de remédiation (rétro-lavage) mis en œuvre en 2018.



Figure 29 : Localisation des forages de production ZCB P1 et d'injection ZCB P2 du doublet géothermique de la ZAC Clichy-Batignolles (75).

3.4.2. Analyse des caractéristiques techniques de l'opération

Les travaux de forage du doublet ont été réalisés entre juillet 2014 et décembre 2014. Ils ont été menés de façon discontinue (travail de 6 jours sur 7).

Les travaux du puits producteur ZCB P1 ont duré 89 jours. Deux sinistres liés à une cimentation défectueuse du tubage 10''3/4 ont causé un retard de 61 jours. Le premier sinistre a conduit à la réalisation d'un *sidetrack*, à partir de 476 m de profondeur. Le second sinistre a nécessité la coupe du tubage 10''3/4 à 75 m de profondeur, le sur-forage en diamètre 13''3/8 de l'espace annulaire, entre les tubages 16'' et 10''3/4 (de 75 à 110 m), puis le fraisage du tubage 10''3/4 jusqu'à 153 m.

Le puits de production ZCB P1 est un puits dévié ayant atteint la profondeur de 764 m (soit 650 m en cote verticale). La déviation a été amorcée à partir de 195 m de profondeur et le *sidetrack* a été initié à partir de 476 m. Au toit de l'Albien, l'inclinaison du puits est de 22,25° et

son azimut est de 344 (orientation nord-nord-est). Le forage est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 16" (de 0 à 177,5 m) et 10"3/4 (de 153 à 666,5 m).

Le diamètre de forage, au niveau du réservoir, est de 9"5/8 et la colonne captante est composée de crépines en inox (304 L), de type JOHNSON MuniPack, technologie *skeleton*, constituées d'une **double paroi interne de diamètre 6"5/8 et externe de diamètre 8"5/8, à fil enroulé renforcé par des lames longitudinales**. Le massif filtrant est constitué de billes de verre de calibre de 1,25 à 1,65 mm. **Le slot des crépines est de 1 mm**. Elles ont été mises en place entre 678,15 et 750,55 m de profondeur, en alternance avec des tubes pleins. La hauteur totale crépinée est de 57 m pour une longueur de réservoir de 69 m.

La coupe géologique et technique du forage ZCB P1 est présentée en Figure 30.

Le puits d'injection ZCB P2 est un puits dévié ayant atteint la profondeur de 755 m (soit 650 m en cote verticale). La déviation a été amorcée à partir de 196 m de profondeur. Au toit de l'Albien, l'inclinaison du puits est de 16,38°, avec un azimut de 158° (orientation sud-sud-est). L'écartement entre les forages P1 et P2 est de 617 m. Le forage P2 est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 16" (de 0 à 164 m) et 10"3/4 (de 140 à 665 m).

Le réservoir a été foré en diamètre 9"5/8, puis alésé en 9"7/8. La colonne de captage (type de crépines, slot et calibre du massif filtrant) est identique à celle du puits producteur ZCB P1. Les crépines ont été mises en place entre 669,7 et 739,1 m de profondeur, en alternance avec des tubes pleins. La hauteur totale des crépines est de 57 m sur une hauteur totale de réservoir de 105 m.

La coupe géologique et technique du forage ZCB P2 est présentée en Figure 31.

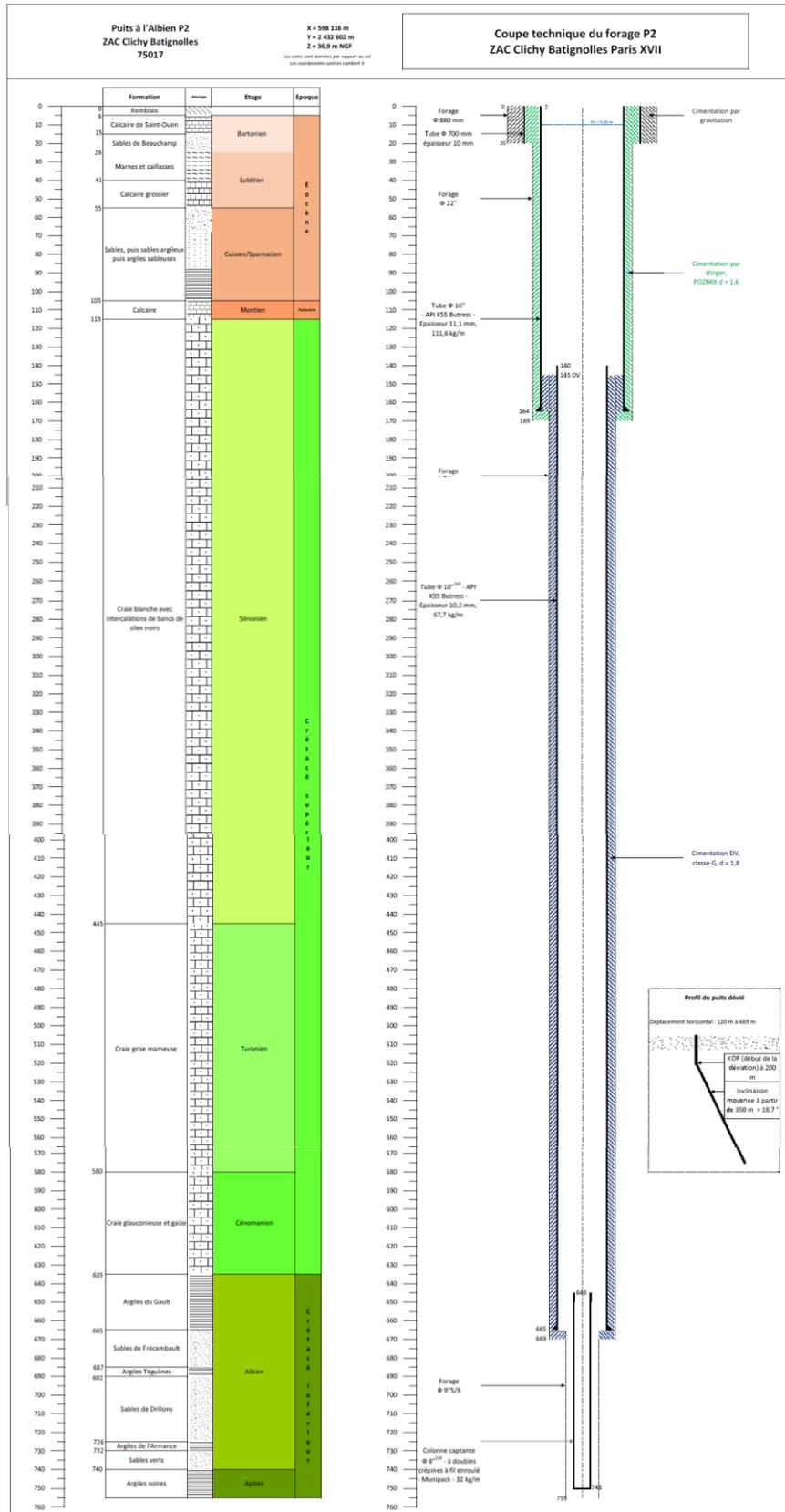


Figure 31 : Coupe géologique et technique du forage d'injection ZCB P2 (d'après DOE).

La phase de développement du forage ZCB P1 (octobre 2014) a été réalisée par air-lift, pendant 40 heures (au débit maximum de 206 m³/h), puis par pompage, durant 16 heures (débit maximum de 230 m³/h). En fin de phase de développement, la turbidité du fluide était faible (1,2 NTU) et la productivité du puits a été évaluée à 5,2 m³/h/m. Des essais de pompage par paliers (décembre 2014) ont ensuite été réalisés à débits croissants (entre 80 et 230 m³/h), comprenant six paliers d'environ 2 heures, entrecoupés par des phases de remontée de pression de même durée. La productivité du forage a été légèrement améliorée (5,4 m³/h/m). L'interprétation de l'essai de longue durée (72 heures, au débit de 205 m³/h) a permis d'évaluer la transmissivité du réservoir à 3,25.10⁻³ m²/s. En fin de phase d'essais, la productivité de l'ouvrage a légèrement diminué (5 m³/h/m) et la température du fluide, en tête de puits, était de 27,3 °C (28,5 °C au niveau du réservoir). Le rabattement mesuré dans le forage P2 était de 3,5 m en fin de phase de production.

Le développement du forage ZCB P2 (août 2014) a été réalisé par air-lift sur une durée de 30 heures (au débit maximum de 194 m³/h), puis par pompage durant 20 heures (débit maximum de 180 m³/h). En fin de phase de développement, la turbidité du fluide était également faible (1,93 NTU) et la productivité du puits a été évaluée à 4,17 m³/h/m. Un traitement par injection d'hexa-méta-phosphates a alors été réalisé, suivi par des essais de pompage par paliers (septembre 2014) : cinq paliers de 2 h 15 à débits croissants (de 80 à 200 m³/h/m), entrecoupés de phases de remontée de pression de même durée. La productivité du puits a peu augmenté (4,3 m³/h/m). L'interprétation de l'essai de longue durée (72 heures, à un débit de 180 m³/h) a permis d'évaluer la transmissivité du réservoir à 2,5.10⁻³ m²/set la productivité finale du puits à une valeur de 4 m³/h/m.

Avant la mise en service du doublet, le développement du forage ZCB P2 (juin 2016) a été repris par pompage (avec rejet à l'égout), suivant trois phases distinctes : cycles de débits constants pendant 50 minutes (entrecoupés d'arrêts de pompage de 10 minutes), cycles de débits constants pendant 15 minutes (avec arrêts de 2 minutes), puis trois essais de longue durée (quelques heures) à débit constant de 180 m³/h. L'indice de productivité du puits a été évalué à 4,4 m³/h/m en fin de développement pour un débit de 216 m³/h.

Les tests d'injection du puits ZCB P2 (septembre 2016) ont été réalisés (avec production depuis le forage P1), avec 5 paliers (de 2 à 4 heures) de débits croissants (entre 110 et 220 m³/h), puis un essai d'injection de longue durée (72 heures), au débit de 180 m³/h. **La stabilité de la pression d'injection a été rapidement atteinte et l'indice d'injectivité du puits P2 a été évalué à 3,8 m³/h.**

Le Tableau 15 ci-dessous présente la synthèse des indices de productivité et d'injectivité évalués, lors des différentes phases de développement et d'essais des puits ZCB P1 et ZCB P2.

Mesure au puits	Date	Durée du test	Pression injection (bar)	Débit inj. max (m ³ /h)	II (m ³ /h/m)	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
ZCB P1	10/2014	40 h				206		Développement air lift
	10/2014	16 h				230	5,2	Développement par pompage
	12/2014	6 x 2h				230	5,4	Essai de prod. par paliers
	12/2014	72 h				205	5	Essai de prod. longue durée
ZCB P2	08/2014	30 h				194		Développement air lift
	08/2014	20 h				180	4,17	1er développement par pompage
	09/2014	5 x 2h15				200	4,3	Essai de prod. par paliers
	09/2014	72 h				180	4	Essai de prod. longue durée
	06/2016	50 min à pls. h				216	4,4	2nd développement par pompage
	09/2016	5 x 4 h	4,39	220	4,12			Essai d'inject. paliers
	09/2016	72 h	3,8	180	3,8			Essai d'inject. longue durée

Tableau 15 : Évolution des indices de productivité et d'injectivité des puits de production (ZCB P1) et d'injection (ZCB P2) du doublet de Clichy-Batignolles relevés au cours des essais, entre 2014 et 2016.

Pour ce qui concerne la caractérisation du réservoir, les épaisseurs des formations sableuses de l'Albien relevées aux puits ZCB P1 et ZCB P2 sont relativement proches : elles sont respectivement de 21 et 26 m pour les sables de Frécambault, 36 et 30 m pour les sables de Drillons et 9 et 8 m pour les sables verts.

La flowmétrie réalisée au puits ZCB P1 (au débit de 52 m³/h) a montré une contribution majeure provenant des sables de Drillons (47 % du débit total), puis des sables verts (36 %) et des sables de Frécambault (17 %).

Pour le puits ZCB P2 (flowmétrie réalisée au débit de 60 m³/h), la contribution majoritaire provient des sables de Frécambault (56 %), puis des sables de Drillons (36 %) et des sables verts (8 %). L'unité des sables de Frécambault semble continue alors que celles des sables de Drillons et des sables verts semblent un peu plus individualisées, avec plusieurs niveaux producteurs.

Les épaisseurs productrices mesurées au forage producteur ZCB P1 sont de 37,6 m (pour 66 m d'épaisseur de formations sableuses) et de 33,9 m au forage injecteur ZCB P2 (pour 64 m d'épaisseur de formations sableuses).

Des analyses granulométriques réalisées à partir des échantillons prélevés au niveau du forage ZCB P1 ont montré que plus de **90 % des grains de sables ont une dimension inférieure à 1 mm et que 6 à 9 % des particules ont une taille inférieure à 80 µm.**

Les analyses physico-chimiques du fluide ont montré une eau de type carbonaté calcique et magnésien, faiblement minéralisée (284 µS/cm pour le puits ZCB P1 et 357 µS/cm pour ZCB P2) et dépourvue d'oxygène dissous. Des concentrations en fer dissous (180 µg/L pour ZCB P1 et moins de 50 µg/L pour ZCB P2) et des traces de manganèse (32 à 35 µg/L) ont été relevées. Le pH est autour de 7,85-7,90.

Sur le plan bactériologique, les analyses ont montré l'absence de germes pathogènes sur le puits ZCB P1 et la présence de bactéries sulfato-réductrices et ferro-oxydantes, dont l'origine est favorisée par la présence de fer dissous dans le fluide. D'après ces analyses, les bactéries ne semblent pas actives puisque la teneur en H₂S est inférieure au seuil de détection et aucune boue d'hydroxydes ferriques, ni voiles bactériens, n'ont été observés au niveau des échangeurs, des filtres ou des crépines. L'eau est à 37,5 °C, lors de la production.

Les filtres en surface sont des filtres cycloniques à tamis de 100 µm.

L'ensemble des données décrites ci-dessus est synthétisé dans les deux tableaux suivants.

Opération	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur (m)	Fonction	Profil	Tubages	Diamètre forage au réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)
Clichy-Batignolles (75)	ZCB P1-(ST)	2014 89 jours (6 j / 7) (2 sinistres)	764 (dévié) 650 (vert.)	producteur	dévié (22°, Az 344°)	acier 16" (0 à 177,5 m) et 10"3/4 (153 à 666,5 m)	trou 9"5/8	crépine inox 304 L JOHNSON MUNIPAK 6"5/8 x 8"5/8 (billes de verre : calibre 1,25 à 1,65 mm) NB : technologie <i>Skeleton</i> (fil enroulé renforcé par lamelles longitudinales)	1	57
	ZCB P2	2014 27 jours (6 j / 7)	755 (dévié) 650 (vert.)	injecteur	dévié (16°, Az 158°)	acier 16" (0 à 164 m) et 10"3/4 (140 à 665 m)	trou 9"5/8 alésé en 9"7/8	identique à ZCB P1	1	57

Tableau 16 : Conception des forages du doublet de Clichy-Batignolles (75).

Forage	Épaisseur de sables propres (m)	Traitement / Développement	Niveau statique (m/sol)	Débit max dvlpt. (m³/h)	Productivité après développement (m³/h/m)	Durée essai (h)	Débit essai (m³/h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m²/s)	Indice de productivité/injectivité (m³/h/m)
ZCB P1-(ST)	37,6	air-lift (40 hrs) + pompage (16 hrs)	3,2	230	5,4	72/24	204,5	40,9	3,25.10 ⁻³ (montée)	5
ZCB P2	33,9	air-lift (30 hrs) + pompage (20 hrs)	9,1	200	4,3	72/24	180	41,9	2,5.10 ⁻³ (montée)	4,3 (IP) et 3,8 (II)

Tableau 17 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de Clichy-Batignolles (75).

3.4.3. Analyse des difficultés rencontrées et de l'historique des travaux de remédiation

Moins d'un an après la mise en service du doublet de Clichy-Batignolles (2016), une augmentation progressive de la pression d'injection a été constatée au niveau du puits ZCB P2.

Suite à l'analyse des données d'exploitation et au diagnostic de l'ouvrage de réinjection, une opération de rétro-lavage a permis de restaurer les performances du doublet.

Analyse des données d'exploitation (2017-2018)

L'analyse des données d'exploitation du doublet, de 2017 à 2018, montre la dégradation progressive de l'indice d'injectivité du forage ZCB P2, à partir de mars/avril 2017 (Figure 32) jusqu'en novembre 2017 (période pendant laquelle le débit d'exploitation a été maintenu à une valeur proche de 120 m³/h), qui s'est poursuivie lors de la saison de chauffe 2017 / 2018 (où le débit d'exploitation a varié entre 120 et 180 m³/h). Sur cette première année d'exploitation, l'indice d'injectivité a diminué d'environ 3,5 à 2,5 m³/h/m.

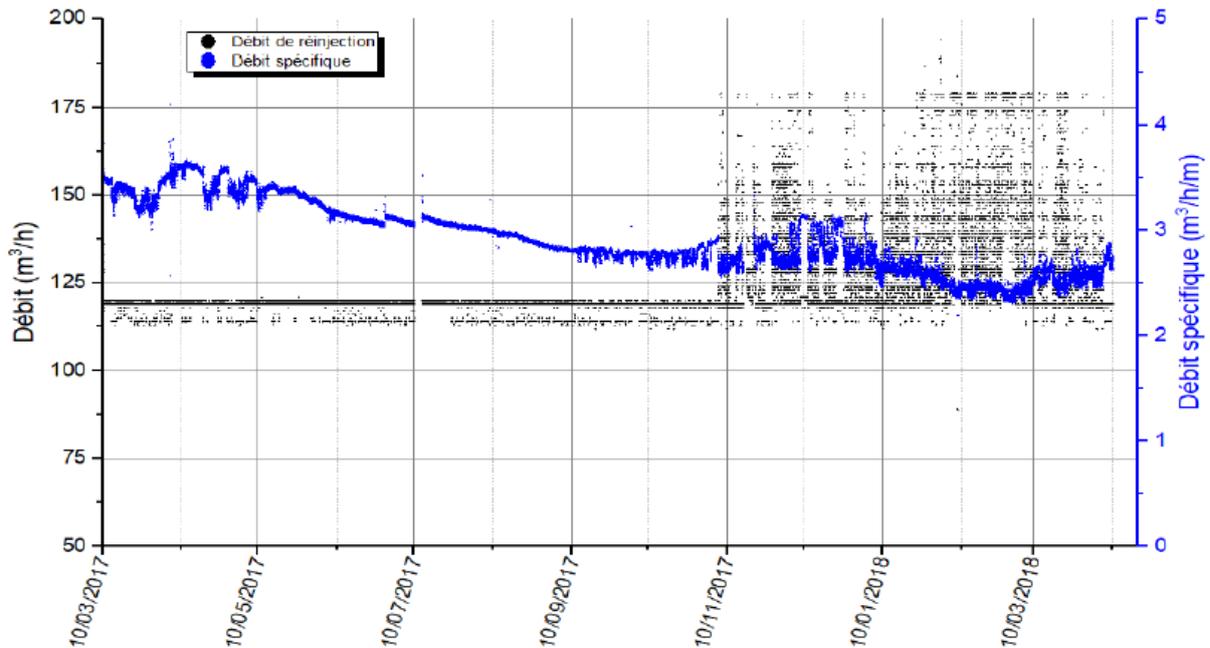


Figure 32 : Évolution de l'indice d'injectivité (débit spécifique) du puits d'injection ZCB P2 et du débit d'exploitation du doublet de Clichy-Batignolles, entre mars 2017 et avril 2018 (d'après ANTEA).

D'après une inspection de l'ouvrage par caméra vidéo, cette baisse de performance a semblé liée à la présence de particules fines colmatant le forage injecteur ZCB P2, sachant, d'autre part, que l'effet de la diminution de la température d'injection de 25 °C à 10 °C faisait baisser l'indice d'injectivité d'environ 0,4 m³/h/m, d'après le suivi d'exploitation réalisé.

Diagnostic et opération de rétro-lavage du forage d'injection ZCB P2 (2018)

Le diagnostic de l'ouvrage (septembre / octobre 2018) a comporté une flowmétrie en injection (au débit de 80 m³/h), un test d'injection par paliers de débit et le contrôle de l'ouvrage (inspection par caméra vidéo et contrôle des cimentations des tubages) :

- la flowmétrie a confirmé les niveaux producteurs observés dans les mêmes conditions (injection) en 2014 : deux sections (de 672 à 682 m et de 696 à 708 m) concentrent la majorité (75 %) du débit injecté, la section crépinée la plus basse ne participant quasiment pas à l'écoulement ;
- le test d'injection a comporté 4 paliers de débit (de 120 à 200 m³/h) d'une heure. L'indice d'injectivité a alors été évalué à 2,9 m³/h/m pour un débit de 200 m³/h (soit en légère diminution par rapport aux performances de septembre 2016 : 3,8 m³/h/m - cf. Tableau 18) ;
- l'inspection vidéo du puits a montré la présence de floculations sur la section supérieure du tubage, des crépines et tubes pleins en bon état (billes de verre bien visibles à travers les fentes des crépines), avec certaines sections présentant des dépôts non consolidés, localisées principalement sur la génératrice inférieure du forage et au droit des niveaux les plus profonds.

L'opération de rétro-lavage a consisté à effectuer :

- des **pistonnages par injection d'air** (suivant 4 paliers de débit d'une heure). Les débits atteints lors du pistonnage à l'air sont estimés autour de 80 m³/h. Cette première phase ne semble pas avoir eu d'effet immédiat sur la performance de l'ouvrage ;
- une **injection d'hexa-méta-phosphates, puis de nouveaux pistonnages à l'air, afin de brasser le produit injecté, puis une série de pompages par paliers de débits (entre 120 et 200 m³/h), avec plusieurs phases de démarrage/arrêt des pompes**. Cette seconde phase a permis de retrouver des performances du puits en pompage, proches de celles identifiées suite au développement initial de l'ouvrage en 2014 (entre 4 et 5 m³/h/m cf. Tableau 18).

Un nouvel essai final d'injection (comportant 4 paliers de débits d'une heure) a confirmé la restauration des performances du puits, avec une pression en tête de puits de 3,8 bar pour un débit maximal de 200 m³/h, valeurs similaires à celles observées lors de la mise en service du doublet, en 2016 (Tableau 18).

Suite à cette opération de rétro-lavage, le doublet de Clichy-Batignolles fonctionne, à nouveau, au débit nominal de 180 m³/h (situation de décembre 2019).

Puits	Date	Durée du test	Pression injection (bar)	Débit inj. max (m ³ /h)	II (m ³ /h/m)	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
P1	12/2014	72 h				205	5	Essai de prod. LD (longue durée)
P2	09/2014	72 h				180	4	Essai de prod. LD
	09/2016	72 h	3,8	180	3,8			Essai d'inj. LD
Investigation P2	28/09/18	4 x 1h	5,9	200	~ 3			Essai d'inj. paliers
	03/10/18	4 x 1h	5,8	200				Essai d'inj. paliers
	05/10/18	1h30				150	~ 5	Pistonnage à air et pompage
	09/10/18	4 x 1h				210	~ 4,3	Essai de prod. paliers
	15/10/18	4 x 1h	3,8	200				Essai d'inj. paliers

Tableau 18 : Rappel des indices de productivité et d'injectivité initiaux (2014/2016) du doublet de Clichy-Batignolles et évolution des paramètres enregistrés au cours de l'opération de rétro-lavage du puits injecteur ZCB P2 en 2018.

En complément, les analyses chimiques ont montré que le fluide reste faiblement minéralisé et sa composition n'a pas varié en fonction du débit de production (la charge en matières en suspension était inférieure au seuil de détection de 2 mg/L).

Le comptage de particules réalisé sur des prélèvements de fluide en têtes de puits, à un débit de 120 m³/h, a semblé montrer que la dimension de la majorité des particules fines serait de taille inférieure à 15 µm de diamètre. Cependant, les conditions de prélèvement et de conservation des échantillons pourraient avoir influencé ces résultats. Il serait, d'autre part, utile de réaliser ces comptages de particules à différents débits (et éventuellement à différentes étapes des opérations), afin de caractériser au mieux les venues et le transfert des particules fines dans la boucle géothermale en fonction du débit.

3.4.4. Enseignements et préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Enseignements relatifs à l'exploitation du doublet

L'origine de la dégradation progressive de l'injectivité du forage ZCB P2 est très probablement liée au transfert de particules fines (en majorité de dimension de 8 à 15 µm de diamètre) du puits de production vers le puits d'injection.

L'opération de rétro-lavage réalisée (2018) sur le forage injecteur a permis de restaurer les performances initiales du doublet de Clichy-Batignolles établies lors de sa mise en service, en 2016.

Afin de pérenniser ces performances, il est envisagé d'adapter les équipements de surface de la boucle géothermale en mettant en place une filtration plus efficace des particules et d'aménager l'installation pour être en mesure de procéder rapidement, ou de façon préventive, à des opérations de rétro-lavage du puits injecteur.

Pour ce qui concerne les complétions en place dans les forages (identiques entre les deux puits du doublet - cf. Tableau 16), l'analyse des vitesses d'entrée du fluide dans les crépines donne des valeurs théoriques comprises entre 0,3 et 0,6 cm/s pour les deux puits, en accord avec les recommandations (vitesse inférieure à 1 cm/s). Pour rappel, ces valeurs sont théoriques et des flowmétries (si possible au débit d'exploitation) permettraient de préciser les venues de particules fines, en particulier dans le puits de production ZCB P1.

Le Tableau 19 ci-dessous présente la synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet de Clichy-Batignolles, depuis la première phase de développement de 2014.

2014 : Forage des puits ZCB P1-ST et ZCB P2 et phase de développement initiale des ouvrages.
2016 (juin et septembre) : Reprise du développement du puits injecteur ZCB P2 et test d'injection.
2016/2017 : Mise en exploitation du doublet. Premières observations de dégradation progressive de l'injectivité du puits ZCB P2.
2018 : Diagnostic du puits ZCB P2 (flowmétrie, inspection vidéo, tests d'injection par paliers) et opération de rétro-lavage (pistonnages par injection d'air, traitement par hexa-méta-phosphates, pompages). Restauration de l'injectivité de l'ouvrage ZCB P2.
2019/2020 : Exploitation à débit nominal de 180 m ³ /h

Tableau 19 : Synthèse des faits marquants de l'exploitation du doublet de Clichy-Batignolles.

Préconisations relatives à l'exploitation du doublet

Les aménagements envisagés (indiqués précédemment ci-dessus) sont totalement pertinents. Une flowmètrie dans le puits producteur, couplée au suivi particulière en surface, à différents débits (et jusqu'au débit d'exploitation), permettrait de mieux caractériser les venues de particules fines afin de contrôler le débit d'exploitation et d'éviter l'encrassement trop rapide du puits injecteur, si la filtration en surface ne suffit pas totalement.

3.5. OPÉRATIONS DE PARIS-SACLAY (ALBIEN) MISES EN SERVICE EN 2019 ET 2020

3.5.1. Contexte et problématique des deux opérations de Saclay

Les opérations géothermiques de Saclay (91), les plus récentes, ciblent les niveaux sableux de l'Albien et correspondent à deux doublets réalisés, respectivement, sur la Zac du Moulon (doublet GMOU1 et GMOU 2) et la ZAC Polytechnique (doublet GEP1 et GEP2).

Elles sont connectées à un réseau de chaleur et de froid sur le campus de Paris-Saclay, qui alimente l'ensemble des bâtiments (construits entre 2017 et 2019) par l'intermédiaire de sous-stations d'échanges. L'opération de la ZAC Polytechnique prévoyait un débit d'exploitation de 200 m³/h, des températures de production d'environ 30 °C et de réinjection de 10 °C, pour une capacité thermique installée de 4,6 MW. Sa mise en service était programmée pour la fin de l'année 2019.

L'opération de la Zac du Moulon a été dimensionnée avec les mêmes caractéristiques de fonctionnement. Sa mise en service était programmée en 2020.

Tenant compte des retours d'expérience précédents, **la filtration en surface mise en place pour ces dispositifs** comprend trois étages composés, de haut en bas :

- d'une **pré-filtration, à 100 µm** (filtres à tamis en Y) ;
- d'une **filtration, à 10 µm** (filtres à cartouche) ;
- d'une **filtration, à 2 µm** (filtres à cartouche).

À la fin de l'année 2019, les essais en boucle des deux opérations ont montré une dégradation de l'injectivité des ouvrages GMOU2 et GEP2. Les doublets sont actuellement à l'arrêt et une étude est en cours pour restaurer l'injectivité de ces ouvrages.

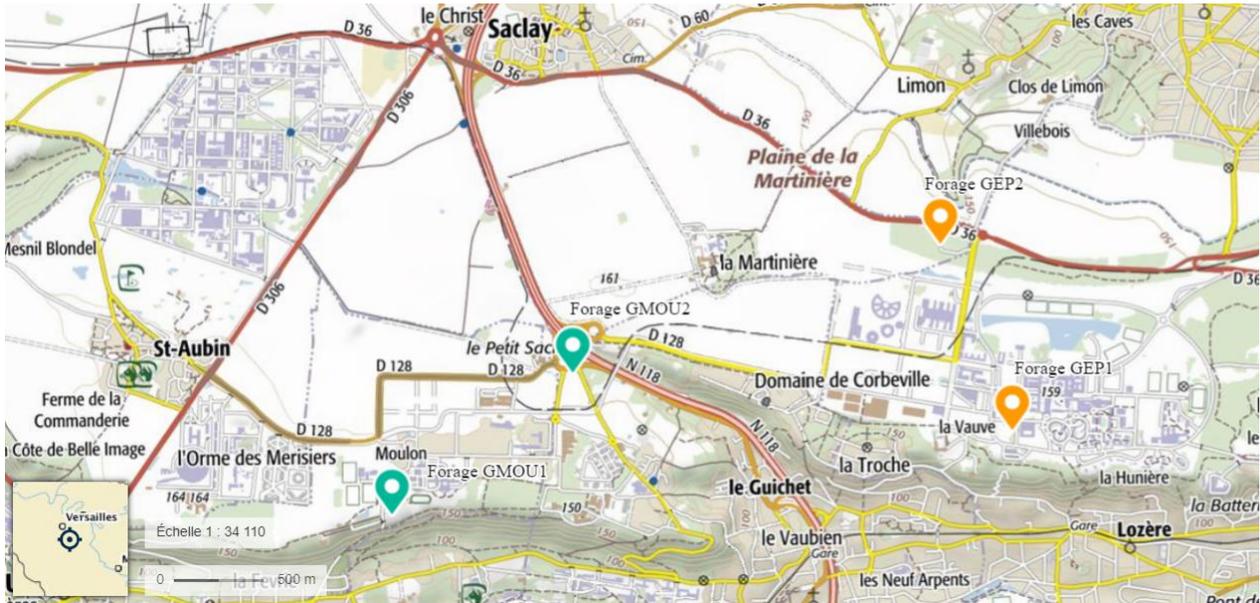


Figure 33 : Localisation des forages GMOU1 et GMOU2 (vert) du doublet géothermique de la Zac du Moulon et des forages GEP1 et GEP2 (orange) du doublet géothermique de la ZAC Polytechnique (91).

3.5.2. Analyse des caractéristiques techniques des opérations

Doublet de la ZAC du Moulon

Les forages de production GMOU1 et d'injection GMOU2 ont été réalisés entre juillet 2017 et décembre 2017. Les travaux de forage ont duré 31 jours pour chacun des puits.

Les forages GMOU1 et GMOU2 sont verticaux et atteignent respectivement 733 et 736 m de profondeur. L'écartement des impacts, au toit du réservoir, est de 1 274 m.

Le forage de production GMOU1 a atteint le réservoir des sables de l'Albien à 655 m de profondeur. Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 18''5/8 (de 0 à 247,5 m) et 13''3/8 (de 0 à 651,95 m).

Le forage du réservoir a été réalisé en diamètre 12''1/4 (entre 655,5 et 733 m), puis alésé en 15''. La colonne de captage est constituée entre 650,8 et 722,8 m d'une **crépine Superweld renforcée, à fil enroulé de diamètre extérieur 10''**. **Le slot des crépines est de 0,7 mm**. Le massif filtrant est constitué de graviers siliceux de calibre 1-2,5 mm. La hauteur totale de crépines est de 72 m.

La coupe géologique du forage GMOU1 est présentée en Figure 34.

Le forage d'injection GMOU2 a atteint le réservoir des sables de l'Albien à 656,5 m de profondeur. Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 18''5/8 (de 0 à 214,5 m) et 13''3/8 (de 0 à 650,51 m).

Le forage du réservoir a été réalisé en diamètre 12''1/4 (entre 653 et 736 m), puis alésé également en 15''. La colonne de captage est constituée entre 615,9 et 723,9 m/sol d'une **crépine identique à celle du puits producteur**. **En revanche, le slot des crépines est de 0,7 mm, entre 633,9 et 651,9 m de profondeur, et de 1 mm, sur les autres sections crépinées**. Le massif filtrant est également constitué de graviers siliceux de calibre 1-2,5 mm. La hauteur totale de crépines est de 108 m.

La coupe géologique du forage est présentée en Figure 35.

Les diagraphies de production (flowmétrie et thermométrie) ont montré qu'au niveau du puits de production GMOU1, les débits de production étaient répartis sur plusieurs petits intervalles de 0,4 à 2,7 m d'épaisseur. Au débit de 159 m³/h (air-lift), les principaux niveaux producteurs se trouvent entre 672,2 et 675 m de profondeur (17 % du débit), puis entre 664 et 666,7 m (14 %). L'épaisseur totale utile a été évaluée à 14 m.

La température de l'eau produite a été mesurée à 30,8 °C à 718,5 m de profondeur.

Au niveau du puits GMOU2, 7 niveaux producteurs ont été identifiés au débit de 200 m³/h (air-lift), donnant une épaisseur totale utile de 17,5 m. Les intervalles producteurs se trouvent majoritairement en fond de puits (entre 715,2 et 722 m), avec environ 60 % de contribution au débit, puis entre 669,2 et 671,5 m (19,2 %).

Coupe litho-stratigraphique (top formation)			
	m/sol	mNGF	Age / Formation
TERTIAIRE	0	160,20	Quaternaire (V ^{air}) / Limon
	8	152,2	Stampien / Sable de Fontainebleau
	90	70,2	Bartonien / Alternance de marnes
	140	20,2	Lutétien / Calcaire
	172,5	-12,3	Yprésien / Argile calcaire plastique
CRETACE SUPERIEUR	185	-24,8	Sénonien / Craie blanche Bio-clastique
	457	-296,8	
	563	-402,8	Turonien / Craie blanche à silex
CRETACE INFERIEUR	617	-456,8	Cénomaniens / Calcaire marneux
	655	-494,8	Albien Supérieur / Argile calcaire
	672,2	-511,8	Albien Inférieur / Sable fin - Moyen à grossier
	726	-565,8	Aptien / Argile grise

Figure 34 : Coupe géologique du puits producteur GMOU1 du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91) d'après DOE.

Coupe litho-stratigraphique (top formation)				
	m/sol	mNGF	Age	Formation
TERTIAIRE	0	151,75	Quaternaire	Limons
	5	146,8	Stampien	Sables de Fontainebleau
				Argiles à Meulière
	82	69,8	Bartonien	Alternances de Marnes et Calcaires
	129,5	22,3	Lutétien	Calcaire
164	-12,3	Yprésien	Argile plastique	
CRETACE SUPERIEUR	178	-26,3	Sénonien	Craie blanche à silex Bio-clastique
CRETACE INFERIEUR	449	-297,3	Turonien	Craie argileuse blanche
	562	-410,3	Cénomannien	Calcaire silteux mameux
	615,5	-463,8	Albien Supérieur	Argile calcaire
	658,5	-504,8	Albien Inférieur	Sable fin - Moyen à grossier
	721,5	-569,8	Aptien	Argile silteuse grise

Figure 35 : Coupe géologique du puits injecteur GMOU2 du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91) d'après DOE.

Le développement du puits producteur GMOU1 (juillet 2017) a été réalisé par air-lift, durant 79 heures (paliers jusqu'au débit maximal de 200 m³/h), puis par pompage. La séquence a duré 7 jours. Après la désinfection du puits à l'OXONIA, des essais de pompage par paliers (novembre 2017) de débits croissants (sans atteindre le débit critique du puits) ont été réalisés :

- les premiers essais comportant 8 paliers de 1 heure (sans remontée de pression), avec des débits de 85 à 265 m³/h, ont permis d'obtenir un indice de productivité de l'ouvrage de 20,88 m³/h/m ;

- les seconds essais comportant 4 paliers de 2 heures (entrecoupés d'une remontée de pression de 2 heures), à des débits de 100 à 269 m³/h, ont permis d'améliorer l'indice de productivité (21,3 m³/h/m) ;
- l'essai de longue durée (72 heures) a été réalisé au débit de 270 m³/h et l'indice de productivité final de l'ouvrage a été évalué à 17,6 m³/h/m.

Le développement du puits injecteur GMOU2 (novembre 2017) a également été réalisé par air-lift, mais sur une durée réduite à 36 heures et 15 minutes (au débit maximal de 200 m³/h), puis par pompage. La séquence a duré 7 jours. Les essais de pompage par paliers (avril 2018) ont été menés successivement, de la manière suivante :

- 4 paliers de 30 minutes enchaînés (sans remontée de pression), à des débits de 70 à 200 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 26,01 m³/h/m ;
- un essai par à-coups de débits d'injection d'air ;
- 4 paliers de 30 min enchaînés (sans remontée de pression), à des débits de 100 à 200 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 23,64 m³/h/m en fin de test ;
- 4 paliers de 2 heures (entrecoupés de remontée de pression), à des débits de 100 à 272 m³/h. En fin d'essai, l'indice de productivité de l'ouvrage a été évalué à 22,78 m³/h/m. Le débit critique du puits GMOU2 a été estimé à 253 m³/h ;
- l'essai de longue durée (72 heures) a été réalisé au débit de 200 m³/h et l'indice de productivité final a été évalué à 18,33 m³/h/m.

Le Tableau 20, ci-dessous, présente la synthèse des différents développements et essais réalisés sur les forages du doublet de la ZAC du Moulon.

Mesure au puits	Date	Durée du test	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
GMOU1	07/2017	79h	200		Développement par air lift
GMOU1	11/2017	8 x 1h	265	20,88	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GMOU1	11/2017	4 x 2h	269	21,3	Essai de prod par palier, avec remontée de pression
GMOU1	11/2017	72h	270	17,6	Essai de prod de longue durée
GMOU2	11/2017	36h	200		Développement par air lift
GMOU2	04/2018	4 x 30'	200	26,01	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GMOU2	04/2018	4 x 30'	200	23,64	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GMOU2	04/2018	4 x 2h	272	22,78	Essai de prod par palier, avec remontée de pression
GMOU2	04/2018	72h	200	18,33	Essai de prod par palier, avec remontée de pression

Tableau 20 : Synthèse des indices de productivité obtenus suite au développement et aux essais de pompages sur les forages GMOU1 et GMOU2.

Les données décrites ci-dessus sont synthétisées dans les deux tableaux suivants.

Opération	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur (m)	Fonction	Profil	Tubages	Diamètre forage au réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)	Longueur forée dans le réservoir (m)
Paris Saclay-ZAC du Moulon (91)	GMOU1	2017 31 jours	733	prod.	vertical	acier 18"5/8 (0 à 247,5 m) et 13"3/8 (0 à 651,95 m)	trou 12"1/4 alésé en 15"	crépine Superweld inox (316 L) 10" renforcée à fil enroulé + gravel pack (1-2,5 mm)	0,7	72	71
	GMOU2	2017 31 jours	736	inject.	vertical	acier 18"5/8 (0 à 214,5 m) et 13"3/8 (0 à 650,51 m)	trou 12"1/4 alésé en 15"	identique à GMOU1	1 mm / 0,7 mm	108	65

Tableau 21 : Conception des forages du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91).

Forage	Épaisseur de sables propres d'après PLT (m)	Débit mesure PLT (m ³ /h)	Développement du puits	Niveau statique (m/sol)	Durée de l'essai long (h)	Débit de l'essai (m ³ /h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Indice de productivité (m ³ /h/m)
GMOU1	14	159	air-lift (79 h) + pompage (7 jours)	113	72/36	270	15,3	7,4.10 ⁻³ (descente) 9,2.10 ⁻³ (remontée)	17,6
GMOU2	17,5	200	air-lift (36 h) + pompage (7 jours)	100,1	72/32	200	10,91	7,9.10 ⁻³ (descente) 6.10 ⁻³ (remontée)	18,33

Tableau 22 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de la ZAC du Moulon - Paris-Saclay (91).

Doublet de la ZAC Polytechnique

Les travaux de forage du doublet ont été réalisés entre septembre 2017 et décembre 2017. Ils ont duré 29 jours pour le puits GEP1, et 26 jours pour le puits GEP2.

Les forages GEP1 et GEP2 sont verticaux et atteignent, respectivement, 755 et 757 m de profondeur. L'écartement des impacts, au toit du réservoir, est de 1096 m.

Le forage de production GEP1 a atteint le réservoir des sables de l'Albien à 680 m de profondeur. Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 18"5/8 (de 0 à 249 m) et 13"3/8 (de 0 à 665,7 m).

Le réservoir a été foré en diamètre 12"1/4 (entre 668 et 755 m), puis alésé en 15". La colonne de captage est constituée entre 665 et 737 m/sol d'une **crépine Superweld renforcée, à fil enroulé de diamètre extérieur 10"**. **Le slot des crépines est de 0,7 mm**. Le massif filtrant est constitué de graviers siliceux de calibre 1-2,5 mm. La hauteur totale de crépines est de 72 m.

La coupe géologique du forage est présentée en Figure 36.

Le forage d'injection GEP2 a atteint le réservoir des sables de l'Albien à 680,5 m de profondeur. Le puits est équipé de tubages en acier, cimentés, de diamètres 18"5/8 (de 0 à 258 m) et 13"3/8 (de 0 à 663 m).

Le réservoir a été foré en diamètre 12"1/4 (entre 666 et 757 m), puis alésé en 15". La colonne de captage est identique au puits GEP1. Par contre, **le slot des crépines est de 0,7 mm entre 656,1 et 674,1 m/sol, et de 1 mm entre 638,1 et 656,1 m, puis entre 674,1 et 746,1 m/sol**. Le massif filtrant est constitué de graviers siliceux de calibre 1-2,5 mm. La hauteur totale de crépines est de 108 m.

La coupe géologique du forage est présentée en Figure 37.

Les diagraphies de production (flowmétrie et thermométrie) du puits GEP1, réalisées par air-lift au débit de 160 m³/h, ont permis d'identifier 7 niveaux producteurs (de 0,8 à 8 m d'épaisseur) donnant une épaisseur totale de 18 m. Les principales contributions se trouvent entre 701 et 709 m de profondeur (50 % du débit) et entre 710 et 714,3 m de profondeur (19 %).

La température du fluide a été mesurée à 32,6 °C.

Au niveau du puits GEP2, les diagraphies de production, réalisées par air-lift au débit de 210 m³/h, ont permis d'identifier 10 niveaux producteurs pour une épaisseur totale utile de 22,1 m. Les principaux intervalles producteurs se situent entre 737,3 et 741 m de profondeur (26 % du débit) et entre 705,1 et 709 m de profondeur (16,5 %).

Coupe litho-stratigraphique (top formation)				
	m/sol	mNGF	Age	Formation
TERTIAIRE	0	158,82	Quaternaire (IV ^{aire})	Limons
	5	153,8	Stampien	Sable de Fontainebleau
	93	65,8	Bartonien	Alternance de marnes
	129,5	29,3	Lutétien	Calcaire
	178	-19,2	Yprésien	Argile calcaire plastique
CRETACE SUPERIEUR	191	-32,2		
			Sénonien	Craie blanche Bio-clastique
	439	-280,2	Turonien	Craie blanche à silex
	587	-428,2	Cénomaniens	Calcaire marneux
CRETACE INFERIEUR	638	-479,2	Albien Supérieur	Argile calcaire
	680	-521,2	Albien Inférieur	Sable fin-Moyen à grossier
	746	-587,2	Aptien	Argile grise

Figure 36 : Coupe géologique du puits producteur GEP1 du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91) d'après DOE.

Coupe litho-stratigraphique (top formation)				
	m/sol	mNGF	Age	Formation
TERTIAIRE	0	153	Quaternaire	Limons
	5	148	Stampien	Sables de Fontainebleau
				Argiles à Meulière
	81	72	Lutétien	Alternances de Marnes, argiles Gypse et Dolomie
				Calcaires
	156	-3		Calcaire et Marnes
		Yprésien	Argiles	
189	-36		Calcaire Versicolore	
CRETACE SUPERIEUR	206	-53	Sénonien	Craie blanche à silex
				Bio-clastique
	464	-311	Turonien	Craie argileuse blanche à craie crayeuse
CRETACE INFÉRIEUR	586	-433	Cénomannien	Calcaire grisâtre à silteux
	637	-484	Albien Supérieur	Argile calcaire
	680,5	-527,5	Albien Inférieur	Sable fin - Moyen à grossier (grisâtre à vert)
	745	-592	Aptien	Argile grise

Figure 37 : Coupe géologique du puits injecteur GEP2 du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91) d'après DOE.

Le développement du puits GEP1 (octobre 2017) a été réalisé par air-lift, durant près de 34 heures et 15 minutes (au débit maximal de 200 m³/h), puis par pompage, pendant 6 jours. Après la désinfection du puits à l'OXONIA, les essais de pompage (novembre 2017) ont été menés, successivement, de la manière suivante :

- 4 paliers de 1 heure (enchaînés), à des débits de 102 à 262 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 12,8 m³/h/m ;
- Un essai par à-coups de débit d'injection d'air ;
- 4 paliers de 1 heure (enchaînés), à des débits de 90 à 262 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 13 m³/h/m en fin d'essai ;
- 4 paliers de 2 heures (entrecoupés de remontée de pression de 2 heures également), à des débits de de 100 à 262 m³/h. En fin d'essai, l'indice de productivité de l'ouvrage a été évalué à 12,7 m³/h/m. Le débit critique n'a pas été atteint ;
- l'essai de longue durée (48 heures) a été réalisé au débit de 200 m³/h et l'indice de productivité final a été évalué à 12,2 m³/h/m.

Le développement du puits GEP2 (décembre 2017) a également été réalisé par air-lift durant un peu plus de 36 heures (au débit maximal de 200 m³/h), puis par pompage pendant 7 jours. Les essais de pompage (avril 2018) ont comporté successivement :

- 4 paliers de 2 heures (enchaînés), à des débits de 70 à 200 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 29,28 m³/h/m ;
- un essai par à-coups de débit d'injection d'air ;
- 4 paliers de 2 heures (enchaînés), à des débits de 70 à 200 m³/h. L'indice de productivité a été évalué à 27,10 m³/h/m ;
- 4 paliers de 2 heures (entrecoupés de remontée de pression de 2 heures), à des débits variant de 100 à 255 m³/h. En fin d'essai, l'indice de productivité a été évalué à 24,73 m³/h/m. Le débit critique n'a pas été atteint ;
- l'essai de longue durée (64 heures) a été réalisé au débit de 205 m³/h et l'indice de productivité final a été évalué à 21,5 m³/h/m.

Le Tableau 23 ci-dessous présente la synthèse des différents développements et essais réalisés sur les forages du doublet de la ZAC Polytechnique.

Mesure au puits	Date	Durée du test	Débit prod. max (m ³ /h)	IP (m ³ /h/m)	Commentaire
GEP1	10/2017	34h15	200		Développement par air lift
GEP1	11/2017	4 x 1h	262	12,8	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GEP1	11/2017	4 x 1h	262	13	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GEP1	11/2017	4 x 2h	262	12,7	Essai de prod par palier, avec remontée de pression
GEP1	11/2017	48h	200	12,2	Essai de prod de longue durée
GEP2	12/2017	36h15	200		Développement par air lift
GEP2	04/2018	4 x 2h	200	29,3	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GEP2	04/2018	4 x 2h	200	27,1	Essai de prod par palier, sans remontée de pression
GEP2	04/2018	4 x 2h	255	24,7	Essai de prod par palier, avec remontée de pression
GEP2	04/2018	64h	205	21,51	Essai de prod de longue durée

Tableau 23 : Synthèse des indices de productivité obtenus suite au développement et aux essais de pompages sur les forages GEP1 et GEP2.

Sur le plan physico-chimique, les fluides sont faiblement minéralisés et dépourvus d'oxygène dissous (4 mg O₂/L) et le pH est autour de 7-8. Les analyses bactériologiques ont montré l'absence de germes pathogènes.

Les données décrites ci-dessus sont synthétisées dans les deux tableaux suivants.

Opération	Forage	Année de réalisation et durée	Profondeur (m)	Fonction	profil	Tubages	Diamètre forage du réservoir	Complétion	Slot (mm)	Hauteur crépine totale (m)	Longueur forée dans le réservoir (m)
Paris Saclay-ZAC Polytechnique (91)	GEP1	2017 29 jours	755	prod.	vertical	acier 18"5/8 (0 à 249 m) et 13"3/8 (0 à 665,7 m)	trou 12"1/4 alésé 15"	crépine Superweld inox (316 L) 10" renforcée à fil enroulé + gravel pack (1-2,5 mm)	0,7	72	66
	GEP2	2017 26 jours	757	inject.	vertical	acier 18"5/8 (0 à 258 m) et 13"3/8 (0 à 663 m)	trou 12"1/4 alésé 15"	identique à GEP1	1 mm / 0,7 mm	108	64,5

Tableau 24 : Conception des forages du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91).

Forage	Epaisseur de sables propres (m)	Développement du puits	Niveau statique (m/sol)	Durée de l'essai long (h)	Débit de l'essai (m ³ /h)	Rabattement (m)	Transmissivité (m ² /s)	Indice de productivité (m ³ /h/m)
GEP1	18	air-lift (34h15) + pompage (6 jours)	110,95	48/35	200	16,3	7,3.10 ⁻³ (descente) 1,1.10 ⁻² (remontée)	12,2
GEP2	22,1	air-lift (36h15) + pompage (7 jours)	103,15	64/32	205	9,5	1,1.10 ⁻² (descente) 9,5.10 ⁻³ (remontée)	21,5

Tableau 25 : Caractérisation initiale de l'Albien au droit du doublet de la ZAC Polytechnique - Paris-Saclay (91).

3.5.3. Premières observations et recommandations pour l'exploitation du doublet

La dégradation de l'injectivité des ouvrages GMOU2 et GEP2, qui semble avoir été perçue lors des essais en boucle des deux opérations en fin d'année 2019, est à analyser. Aucune recommandation ne peut être produite en l'état de connaissance.

Toutes les précautions semblent avoir été prises lors de la phase de conception du projet, en particulier :

- le dispositif de filtration mis en place en surface doit permettre de retenir les particules fines produites par le puits producteur jusqu'à 2 μm ;
- les architectures des 4 puits sont similaires et tous les puits sont verticaux ;
- les complétions sont identiques, à l'exception de l'ouverture (slot) des crépines des puits injecteurs, qui a été réduite à 0,7 mm sur certaines sections et à 1 mm pour les autres.

4. Retour d'expérience international

4.1. RETOUR D'EXPÉRIENCE AUX PAYS-BAS ET AU DANEMARK (PROJET GUIDOCLAST, 2016-2018)

Un retour d'expérience des opérations de géothermie profonde ayant ciblé des réservoirs clastiques en Europe du Nord a été établi, dans le cadre du projet GUIDOCLAST, entre 2016 et 2018. L'étude comporte l'analyse des opérations réalisées au Danemark (3 doublets) et aux Pays-Bas (12 doublets), sur la base des données récoltées auprès des exploitants (Bugarel et al., 2018, 2016). Cette étude a permis d'identifier les bonnes pratiques mises en place, lors des phases de conception des ouvrages, de la réalisation des travaux et des essais de production et d'exploitation des doublets.

Ainsi, lors de la conception des ouvrages, un accompagnement scientifique des projets portant sur la connaissance géologique du sous-sol est réalisé, notamment à partir des données géophysiques (sismiques) existantes ou acquises, à l'occasion de l'étude d'un nouveau projet. L'outil ThermoGIS, mis à disposition des opérateurs et développé par TNO, est un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les potentiels théoriques, techniques et économiques associés à la ressource géothermale. D'après les nombreux incidents majeurs, enregistrés lors des travaux de forage (*side-tracks*) au Danemark et aux Pays-Bas, il semble que la connaissance locale des caractéristiques géologiques est parfois insuffisante. Les pistes identifiées pour limiter les risques opérationnels portent sur l'acquisition, par les opérateurs, de l'expérience nécessaire (fiabilité des programmes de travaux, dont le programme de boue) et la réalisation préalable de forages exploratoires verticaux au droit de la zone d'intérêt pour limiter les risques liée à l'exploitation et acquérir les connaissances permettant de développer ensuite des projets industriels (granulométrie, composition des formations et du fluide, propriétés du réservoir, etc.).

Les bonnes pratiques identifiées relatives aux essais de production concernent, principalement, l'augmentation de la durée de la phase initiale correspondant au développement des ouvrages. L'augmentation progressive des débits est également de rigueur, lors des phases suivantes correspondant aux essais de pompage ou de réinjection. Elle doit prendre en compte les caractéristiques du réservoir, le dimensionnement des crépines et les équipements de traitement des fluides en surface (bassin de stockage, usage secondaire des eaux produites au cours des phases, etc.). La filtration en surface, pendant le nettoyage des ouvrages (en début de phase de développement), permet également d'éviter l'encrassement des niveaux producteurs du puits, dans lequel le fluide est réinjecté.

En ce qui concerne la phase d'exploitation des doublets, les opérations des Pays-Bas ont montré que, pour 6 cas sur 11, aucune baisse d'injectivité n'a été observée, bien que les débits soient supérieurs à 200 m³/h, avec des pressions d'injection pouvant être élevées (jusqu'à 45 bar dans un des cas). Trois opérations ont rencontré des problèmes liés à la mauvaise connectivité des ouvrages au réservoir, qui ont pu être résolus, grâce à des interventions sur les puits. Seulement 2 cas sur 11 présentent des problèmes majeurs remettant en cause la rentabilité économique des projets, à cause de mauvaises transmissivités du réservoir et des difficultés à l'injection. Les bonnes pratiques identifiées sont alors (1) de limiter les débits d'exploitation à 200 m³/h et d'ajuster les débits en fonction de l'épaisseur utile du réservoir et des diamètres des forages, (2) d'augmenter les débits progressivement pour équilibrer le fonctionnement du réservoir et ne pas faire d'à-coups trop importants en débits (pressions), et (3) d'adopter des mesures de filtration en surface ou de nettoyage du puits injecteur, en cas de baisse constatée de l'injectivité.

D'autres problématiques de dépôt/corrosion et de production de gaz ont également été identifiées. Ces phénomènes ont été traités par l'injection d'inhibiteur de corrosion, le suivi régulier par diagraphie de l'état des ouvrages, l'injection d'azote dans les conduites de surface (pour éviter l'entrée d'air dans la boucle géothermale et ainsi les phénomènes de précipitation), la filtration en amont et en aval des échangeurs (jusqu'à 1 µm) et par la mise en place de procédures de sécurité du personnel, en cas de dépôts de substance radioactives. Les émissions de gaz ont été solutionnées grâce au positionnement de la pompe dans les puits, en cohérence avec le point de bulle, à la mise en place de procédures de sécurité du personnel et à la valorisation des gaz produits (exemple : CO₂ pour serres ou CH₄).

4.2. AUTRES EXPÉRIENCES EN MATIÈRE DE BAISSÉ D'INJECTIVITÉ

Les difficultés de réinjection des eaux géothermales dans les formations clastiques ont été reportées dans plusieurs travaux de recherche scientifique (Battistelli *et al.*, 2000 ; Kabus *et al.*, 1995 ; Mahler, 1995 ; Stefánsson, 1997 ; Szita, 1995 ; Ungemach, 2003). La plupart des exploitations géothermales ciblant des réservoirs de nature argilo-sableuse ou argilo-gréseuse montrent une baisse progressive des performances en injection due au colmatage des ouvrages et du réservoir par des particules fines en suspension, ou suite à des précipitations des éléments chimiques présents dans les fluides géothermaux.

Les différents endommagements des formations clastiques et leurs mécanismes ont été décrits dans plusieurs travaux (Barkman *et al.*, 1972 ; Khilar *et al.*, 1998). Cependant, malgré de nombreuses observations au niveau des exploitations géothermales, les causes précises de colmatage des formations clastiques et les liens entre les différents phénomènes en jeu, qu'ils soient mécaniques, physico-chimiques ou encore thermiques, restent encore aujourd'hui mal compris.

Des auteurs (Battistelli *et al.*, 2000) décrivent les différentes causes possibles de la baisse d'injectivité au niveau des opérations géothermales de basse température, en Pologne. D'après ces travaux, elles peuvent provenir des filtrations insuffisantes des eaux avant la réinjection, des vitesses élevées d'écoulement dans le proche réservoir, du gonflement des formations argileuses, du dépôt de particules dans le puits (*scaling*) et de la présence de bulles de gaz dans le fluide d'injection. Ces phénomènes interviennent, en général, au cours des phases de test des formations. Pour réduire le risque financier lié à la réinjection dans les formations sableuses, certains auteurs (Battistelli *et al.*, 2000) envisagent, notamment, d'utiliser un second aquifère non clastique pour réinjecter les fluides. Cette solution requiert, au préalable, une caractérisation fine de la compatibilité physico-chimique des eaux de chaque aquifère, les impacts liés à leur mélange, dans les conditions d'exploitation, et les éventuels traitements à réaliser, avant la réinjection. Elle entraîne également la déplétion de l'aquifère producteur et nécessite, donc, de quantifier, avec précision, les débits d'exploitation permettant de limiter les baisses de pression dans le temps.

Afin d'améliorer la compréhension des phénomènes impactant la réinjection du fluide dans les formations clastiques et les interactions éventuelles entre les phénomènes, il convient de caractériser au mieux les propriétés physico-chimiques des formations géologiques et des fluides exploités, grâce à des études approfondies sur les sites d'exploitation, mais aussi en laboratoire (Ungemach, 2003). Il convient également de concevoir les ouvrages dans les règles de l'art et de soigner les phases relatives à la mise en place des complétions et au développement des puits pour optimiser les performances de ce type d'exploitation complexe et éviter des dommages irréparables.

Le retour d'expérience des opérations géothermiques dans les formations sableuses, en Australie (Pujol *et al.*, 2018), présente les bonnes pratiques en matière de conception et de contrôle des vitesses d'écoulement. En début de projet, un puits pilote de petit diamètre (216 mm, en général, *i.e.* 8 "1/2) est réalisé, afin d'obtenir des informations complémentaires sur la géologie et l'hydrogéologie, à l'échelle locale, grâce à des diagraphies, des flowmetries face aux formations productrices (*via* la mise en place de *packers* extensibles), l'analyse des *cuttings* et de la distribution granulométrique des particules. La conception des ouvrages d'exploitation est entreprise, suite à ces investigations, afin d'adapter et de dimensionner au mieux les crépines et massifs filtrants utilisés (nature, hauteur, ouverture et diamètre des crépines, calibre du massif filtrant, etc.). Les forages sont généralement équipés de tubages en acier inoxydable (de 219 mm ou de 244 mm de diamètre), de crépines renforcées à fils enroulés (de 180 mm de diamètre), dont le slot (ouverture) est compris entre 0,35 et 0,50 mm, au droit des formations sableuses. Des tubes pleins sont disposés face aux formations dont les sédiments sont les plus fins. Le développement des ouvrages est réalisé par *jetting* et par air-lift sur une durée pouvant aller jusqu'à 100 heures ou jusqu'à obtenir une concentration de particules fines en suspension inférieure à 5 mg/L. Un indice de bon développement (*skin* négatif) a ainsi été obtenu pour la majeure partie des ouvrages développés selon ces méthodes. Les recommandations, en ce qui concerne la vitesse du fluide à l'entrée de la crépine, privilégient le respect de la limite de 3 cm/s proposée par les fabricants. Pour les ouvrages étudiés par certains auteurs (Pujol *et al.*, 2018), les vitesses ne dépassent pas 1,2 cm/s. L'entrée d'air, dans le puits d'injection, a été évitée grâce à l'usage de valves de maintien de pression en fond de puits permettant de limiter les pressions en surface autour de 2 bar.

Il a été établi (Pujol *et al.*, 2018) des corrélations entre le taux de colmatage et différents paramètres tels que la perméabilité, le débit total ou le débit au niveau des formations propres, la turbidité et le nombre de Reynolds. Il apparaît, dans ces travaux, que le colmatage peut être réduit, lors de la réinjection dans les formations clastiques en (1) ciblant les horizons de forte perméabilité (supérieurs à 1500 mD), (2) limitant le débit de 1 à 2,5 m³/h par mètre d'aquifère propre, (3) fixant la filtration entre 5 et 25 µm pour une turbidité entre 1,5 et 5 mg/L. Le retour d'expérience montre que le nettoyage des ouvrages par une nouvelle opération de développement est généralement suffisant pour restaurer l'injectivité, en cas de colmatage avéré des ouvrages.

Aux Pays-Bas, les causes du colmatage des ouvrages par des particules fines et les mesures préventives à appliquer ont été étudiées (Van Beek *et al.*, 2009). Ces travaux montrent que le colmatage des ouvrages exploitant les formations sableuses est principalement dû à l'accumulation de particules fines dans le puits. Afin de limiter le colmatage, il convient, d'après ces travaux, d'imposer des marches/arrêts de l'exploitation pour enlever les particules accumulées dans les ouvrages et dans le proche puits. Les auteurs recommandent également de réduire les vitesses d'exploitation pour limiter la quantité de particules en mouvement dans le puits, de privilégier les ouvrages avec de gros diamètres et d'augmenter la hauteur des crépines.

Les effets chimiques sur la baisse d'injectivité ne sont généralement pas associés aux exploitations de géothermie profonde puisque les eaux produites sont réinjectées dans la formation d'origine. Cependant, il est possible que des changements thermodynamiques, dus à la réinjection du fluide froid, aux modifications locales de la pression, aux dégazages et au changement de pH, puissent engendrer des phénomènes thermochimiques. Des dépôts de silice et carbonatés peuvent alors apparaître et colmater les ouvrages (Vetter *et al.*, 1982).

Les effets microbiologiques peuvent intervenir, lorsque l'on se trouve dans des réservoirs où les eaux sont riches en fer et manganèse et lorsque les températures sont faibles. C'est le cas des ouvrages d'injection de la mer du Nord (Rosnes *et al.*, 1990). Des voiles de bactéries peuvent alors bloquer les pores des formations ou les complétions des forages, et ainsi réduire la

connectivité hydraulique. Les solutions généralement mises en place consistent à traiter les ouvrages avec des biocides.

5. Recommandations pour améliorer les conditions d'exploitation relatives aux opérations géothermiques de l'Albien et du Néocomien (Bassin de Paris)

L'analyse des retours d'expérience récents des opérations géothermiques exploitant les aquifères sableux de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris confirme que la cause principale des pertes de performances des doublets est liée à la dégradation de l'injectivité des puits injecteurs. Le colmatage, plus ou moins rapide, de ces puits est, très probablement, dû au transfert de particules fines provenant des puits producteurs. Pour la totalité des opérations réalisées en Île-de-France (6), les difficultés d'injection ont été rencontrées dès les phases initiales de développement et d'essais de pompage des ouvrages et se poursuivent, voire se détériorent, lors de l'exploitation des doublets. Les endommagements du réservoir dans un rayon proche du puits injecteur peuvent être plus importants pour certains cas, où les opérations de remédiation (rétro-lavage en particulier) semblent avoir un effet limité.

L'origine des dégradations de l'injectivité, à cause des effets thermiques, chimiques ou bactériologiques du fluide géothermal, semble être écartée, à ce stade, pour ces opérations. Cependant, il reste primordial de poursuivre les suivis d'exploitation intégrant, notamment, ces paramètres du fluide, afin d'identifier l'impact de ces phénomènes sur d'éventuelles dérives dans le temps de la performance des doublets. En effet, d'après de nombreux travaux de recherches (Khilar *et al.*, 1983 ; Rosnes *et al.*, 1990 ; Ungemach, 2003), il apparaît que les causes du colmatage des ouvrages peuvent être dues à la concomitance de plusieurs phénomènes que sont la mobilisation et la migration des particules fines en suspension, la présence de bulles de gaz ou la contamination à l'air, la prolifération de bactéries, des réactions chimiques liées aux variations de température et de pression.

Les recommandations formulées dans les chapitres suivants ont donc pour objectifs de proposer des solutions préventives (en particulier pour de nouveaux projets) et curatives (pour les opérations existantes) visant à :

- limiter l'entrée des particules fines dans le puits de production et leur transfert vers les ouvrages de réinjection ;
- éviter le colmatage des ouvrages injecteurs ;
- restaurer les performances des doublets.

Ces recommandations sont basées sur le retour d'expérience des opérations de l'Albien et du Néocomien. Elles intègrent notamment le rappel des bonnes pratiques à mettre œuvre pour la réalisation des projets de géothermie ciblant des aquifères sableux (formations clastiques) ainsi que des mesures préventives et curatives pouvant être mise en place, depuis la phase de conception des doublets et la réalisation des travaux de forages (en particulier pour ce qui concerne les complétions), la caractérisation du réservoir, le développement des puits et les essais de pompage, jusqu'à l'exploitation des dispositifs (Hamm *et al.*, 2019).

Il ne s'agit pas ici de définir des prescriptions mais bien de proposer des éléments pour venir en aide aux professionnels de la géothermie et acteurs de la filière, pour les projets actuels de l'Albien et du Néocomien en difficultés ainsi que pour les porteurs de nouveaux projets de géothermie dans ce type d'environnement silico-clastique. Les tableaux de synthèses (Tableau 26, Tableau 27 et Tableau 28) présentent les recommandations et bonnes pratiques suivant l'ordre chronologique des phases d'un projet de géothermie.

5.1. PRÉCONISATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES OUVRAGES ET A LA RÉALISATION DES TRAVAUX

D'une manière générale, le retour d'expérience réalisé dans le cadre du projet GUIDOCLAST (Bugarel *et al.*, 2018) a présenté des pistes d'améliorations pour la réalisation des travaux et des phases de développement et d'essais :

- le fonctionnement en continu du chantier (*i.e.* 24h/24h), qui permet d'éviter les retards et temps morts liés à la mise en sécurité des puits, lors des interruptions les nuits et les week-ends ;
- le dimensionnement des unités de fabrication et de traitement des boues de forage le mieux adapté aux conditions de chantier ;
- la supervision des travaux avec la présence, en permanence, du prestataire en charge du conditionnement des boues de forage, notamment ;
- le dimensionnement du massif filtrant (calibre, type, volume) en accord avec les caractéristiques des formations (pour limiter la production de particules fines) et le contrôle de sa mise en place, avant et après développement (par inspection vidéo ou diagraphie gamma-gamma) ;
- le développement des ouvrages, avec des débits progressifs (jusqu'au débit d'exploitation visé) et des durées suffisantes pour les différentes phases de production, avec contrôle de la turbidité du fluide.

Dès la conception des ouvrages, il est primordial d'anticiper les mesures préventives, qui devront être mises en œuvre pour limiter le risque de colmatage des ouvrages d'injection exploitant une ressource géothermale de type clastique.

Les **bonnes pratiques en matière de conception des ouvrages de géothermie** sont détaillées dans plusieurs fiches de bonnes pratiques dans le rapport BRGM/RP-65443-FR (Hamm *et al.*, 2019). Les fiches s'appuient sur les retours d'expérience des opérations de géothermie profonde au Dogger et à l'Albien / Néocomien et donnent des éléments techniques correspondant à des thématiques spécifiques : forages (architecture des puits, annulaires restreints, fluide de forage et de complétion et architectures nouvelles), tubages (matériaux composites et centrage des tubages), cimentations (mode de cimentation, attente de séchage du ciment, abandon des forages et critères analyse cimentations), déviations (paramètres et qualité des déviations), complétions dans les aquifères sableux et diagraphies (contrôle de cimentation, des tubages et diagraphies de réservoir).

Afin de préserver la qualité de l'eau, l'usage de bactéricides (biocides) dans les fluides de forage et la désinfection des matériaux de fond pour éviter la prolifération de bactéries sont nécessaires.

Du point de vue de la ressource géothermale, les réservoirs de l'Albien et du Néocomien sont bien connus et montrent de bonnes caractéristiques hydrogéologiques, au centre du Bassin de Paris. Les retours d'expériences étrangers montrent qu'il peut être bénéfique d'améliorer les connaissances locales des aquifères, grâce à l'acquisition de données supplémentaires, avant la conception des ouvrages d'exploitation, *via* la réalisation d'un forage vertical exploratoire au niveau des zones ciblées pour l'exploitation, des mesures de diagraphie et des essais de formation ou encore des analyses granulométriques. Ces investigations préliminaires permettent d'optimiser le dimensionnement des futurs ouvrages d'exploitation et d'adapter les complétions (crépines et massif filtrant) en fonction de la granulométrie, de la transmissivité du réservoir et des niveaux producteurs traversés au droit du site. Cependant, bien que l'acquisition de données permette *a priori* de réduire le risque opérationnel et financier sur le long terme, les contraintes

financières des opérateurs ne permettent pas toujours, à l'heure actuelle, d'envisager ce type de phase exploratoire.

Généralement, les complétions sont donc pré-dimensionnées, lors des études d'avant-projet (géologique et hydrogéologique), en se basant, notamment, sur les travaux déjà réalisés dans le secteur. Les variations latérales de facies peuvent être importantes dans ce type d'environnement, dans le cas où des phases exploratoires seraient envisagées, il est conseillé de procéder aux investigations autant que possible au niveau des zones ciblées pour l'exploitation. Pour la réalisation du second forage d'un doublet, le dimensionnement de l'ouvrage et sa complétion peuvent être adaptés aux informations géologiques et hydrogéologiques acquises lors du premier forage, et ainsi anticiper les contraintes d'approvisionnement du chantier vis-à-vis du type de complétion notamment (position et ouverture des crépines adaptées à la granulométrie des niveaux producteurs).

Indépendamment de la nature des réservoirs ciblés, la déviation des forages géothermiques profonds peut générer des difficultés particulières, notamment, lors des opérations de cimentation des tubages et lors de la mise en place du massif filtrant derrière les crépines. Les opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien étant majoritairement réalisées en milieu urbain, des contraintes foncières imposent généralement de réaliser un des deux ouvrages en puits dévié (point de départ en surface unique). L'écartement entre les points d'impact au réservoir des puits d'injection et de production doit être suffisamment important pour maîtriser le risque d'une percée thermique lié à la réinjection du fluide froid. Lorsque les contraintes de surface le permettent, il peut être envisagé de réaliser des ouvrages verticaux pour limiter le risque opérationnel, lors de la mise en place des massifs filtrants. Cependant, ce profil de forage réduit la longueur de pénétration dans le réservoir en comparaison des ouvrages déviés, ce qui peut représenter, *a priori*, un désavantage pour l'injection. Lors de la conception, il convient donc de quantifier les risques opérationnels engendrés par un forage dévié, selon un profil classique (profil en « J ») par rapport à un ouvrage vertical, et le gain en injectivité espéré. Des déviations selon un profil en « S » (première section verticale, deuxième section déviée et troisième section à nouveau verticale au droit du réservoir) pourraient également faire l'objet d'une étude technico-économique comparative, sachant que cette technique permettrait de ne conserver qu'une plateforme unique pour la réalisation des forages, de dévier les deux puits, afin d'obtenir l'écartement nécessaire et de mettre en place les complétions des ouvrages dans la dernière section verticale des puits.

Étant donné les difficultés d'injection au niveau des formations sableuses, il semble important que les ouvrages ne préfigurent pas, à l'avance, de leur fonction d'injecteur ou de producteur. La fonction finale de l'ouvrage peut, en effet, être définie *a posteriori*, selon les caractéristiques hydrogéologiques les plus favorables du réservoir. Ce choix peut donc intervenir suite aux développements et aux essais de production et d'injection de chaque ouvrage, et se faire en considération des indices de productivité et d'injectivité obtenus.

De même, une architecture relativement identique entre les ouvrages d'un doublet représente un atout puisqu'elle permet de limiter les différences entre ouvrages (e.g. pertes de charges, hauteur totale de réservoir traversée, diamètre tubage, etc.) qui entraînent généralement des désavantages à l'injection ou en production. C'est notamment le choix qui a été fait pour les ouvrages de Paris-Saclay (cf. section 3.5).

Les bonnes pratiques pour le **dimensionnement des crépines et du massif filtrant** dans ce type de formation sableuses doivent prendre en compte différents aspects. D'une part, les complétions doivent être compatibles avec la possibilité d'injecter, mais aussi de produire par ce même ouvrage. En effet, le retour d'expérience montre que des inversions de flux ponctuelles (mises en production du forage injecteur) peuvent être nécessaires et bénéfiques pour décolmater et nettoyer l'ouvrage, lors de la phase initiale de développement, mais aussi en phase

d'exploitation (cf. section 5.3.4). Ensuite, le dimensionnement des crépines et du massif filtrant doit être en accord avec la nature et la granulométrie des formations traversées (informations acquises lors de la réalisation du forage, avec notamment l'analyse granulométrique des *cuttings*), mais il doit aussi être adapté aux conditions d'exploitation envisagées pour le doublet et à la structure du puits (diamètre des colonnes, inclinaison). Le dimensionnement porte alors sur :

- le choix du type de crépines (fil enroulé, double parois, etc.) ;
- le diamètre, la hauteur et l'ouverture (slot) des crépines ;
- la nature, le volume et le calibre du massif filtrant ;
- la longueur des hauteurs de crépines et de tubes pleins (positionnés au droit des formations argileuses pour limiter l'entrée de particules fines) ;
- le système de suspension de la colonne captante, le raccord diélectrique, le tube à sédiments, le centreur de colonne.

La caractérisation de la distribution des tailles de particules et l'analyse de la charge particulaire de l'eau sont alors des informations utiles pour le choix, notamment, du calibre du massif filtrant de la colonne captante, des filtrations en surface et des débits admissibles durant l'exploitation.

Pour améliorer le dimensionnement des complétions, il convient également d'estimer les vitesses d'entraînement, à l'entrée des crépines admissibles, en considérant la limite seuil de 1 cm/s admise (Solages, 1979) pour éviter la déstabilisation des formations du proche puits. Ce calcul peut être fait en phase de conception, à partir de la hauteur totale de crépines envisagée et du débit d'exploitation maximal. Cette estimation donnera ainsi une valeur minimale de vitesse d'entrée dans les crépines, si l'on considère que toute la hauteur crépinée participe à l'écoulement. Les hauteurs utiles à l'écoulement étant généralement moins importantes (elles peuvent varier entre 15 et 95 % suivant les ouvrages), il convient de faire plusieurs projections, avec différentes hypothèses de hauteur utile, afin de définir des débits admissibles pour une complétion donnée.

Les complétions sont généralement constituées de crépines en acier inoxydable (304L ou 316L), qui permettent de limiter les phénomènes de corrosion. Les colonnes sont suspendues dans les tubages de production en acier et comportent un joint diélectrique (corrosion galvanique).

Il est, d'autre part, indispensable de mettre en place des complétions au plus grand diamètre possible (pour réduire les pertes de charge et diminuer la vitesse d'entrée du fluide dans les crépines), comportant systématiquement des tubes pleins, au droit des sections argileuses, et de réduire, le plus possible, l'ouverture des crépines.

D'un point de vue particulier, le type de crépines utilisé pour la complétion de certains puits producteurs, constitué d'un fil enroulé sur un tube perforé (par des trous de 16 mm de diamètre), ne paraît pas être le mieux adapté pour limiter le passage des particules fines vers le puits injecteur. Les perforations dans le tube de la colonne captante, notamment, ont probablement pour effet de concentrer le débit sur des sections restreintes, accélérant localement la vitesse d'écoulement du fluide à l'entrée de la crépine et favorisant, par conséquent, la mobilisation des particules fines dans le proche réservoir. De même, le type de crépines utilisé pour la complétion de certains puits injecteurs (paroi externe à nervures repoussées) est probablement une des causes d'aggravation de la situation, lorsque ces puits sont mis en production (opérations de développement, nettoyage, rétro-lavage). Il pourrait provoquer un dégazage du fluide et l'ouverture des crépines probablement trop importante (slot de 1 mm), compte-tenu de la taille des particules fines (volume très important de sable produit, lors d'une opération de nettoyage). Les opérations de nettoyage successives ont ainsi pu aggraver l'état du puits par la déstabilisation du proche réservoir.

Le retour d'expérience des opérations géothermiques, dans les formations sableuses, en Australie (Pujol *et al.*, 2018), a notamment permis de constater que, pour des projets similaires, les forages géothermiques sont équipés de crépines d'une dimension d'ouverture nettement inférieure (0,35 à 0,50 mm) à celles couramment mises en place pour les opérations de l'Albien/Néocomien en France (0,7 à 1 mm). Il apparaît également, dans ces travaux, que le colmatage peut être limité, lors de la réinjection dans les formations clastiques en ciblant les horizons de forte perméabilité (supérieurs à 1500 mD), en limitant le débit de 1 à 2,5 m³/h par mètre d'aquifère propre et en fixant la filtration entre 5 et 25 µm pour une turbidité entre 1,5 et 5 mg/L.

La Figure 38 présente un exemple de crépines à double paroi, pré-gravillonnée et à fil enroulé, que l'on peut trouver au niveau de quelques ouvrages de l'Albien et du Néocomien.

Des aménagements au niveau des puits et en surface peuvent également être recommandés dans le cas où des opérations de rétro-lavage s'avèreraient nécessaires pour pouvoir restaurer l'injectivité des ouvrages. Le protocole mis en place sur plusieurs opérations est présenté en détail en section 5.3.4.

La présence permanente d'une ingénierie spécialisée s'impose, en particulier, pour la conception des essais hydrogéologiques, leur mise en œuvre (y compris la gestion des fluides produits) et leur interprétation. La mobilisation des compétences d'une entreprise expérimentée dans le secteur de la géothermie, ayant une bonne connaissance des risques techniques liés aux forages et à l'incertitude géologique et hydrogéologique associée à ce type de projet, est généralement un atout.

Le contrôle du placement des crépines et du massif filtrant peut être réalisé par contrôle vidéo en fin de travaux de forage pour valider leur mise en place, avant de débiter le nettoyage et le développement des ouvrages.



Figure 38 : Crépine pré-gravillonnée en acier inoxydable Johnson Muni-Pack (gauche) et crépine en acier inoxydable 304 et 316 L à fil enroulé (droite) (source : JOHNSON).

Le Tableau 26 ci-dessous présente une synthèse des recommandations et mesures à considérer, lors des phases de conception et de réalisation des travaux pour les opérations à l'Albien et au Néocomien.

Mesures	Objectifs	Type	Phase d'application
Acquérir des données supplémentaires pour améliorer la connaissance du réservoir (e.g. forage exploratoire vertical ou via un premier forage d'exploitation) avant de définir les éléments constitutifs des ouvrages d'exploitation	Caractériser le réservoir et adapter au mieux le dimensionnement des ouvrages d'exploitation	Recommandation	Exploration
Respecter les bonnes pratiques en matière de conception des ouvrages et de dimensionnement des éléments constitutifs (e.g. diamètre, tubage, complétions) en fonction des caractéristiques des formations	Améliorer la qualité des opérations géothermiques à court terme	Bonne pratique, (Hamm et al., 2019)	Conception Travaux
Prendre en considération les risques opérationnels liés à la réalisation d'ouvrage dévié (pose des massifs filtrant). Considérer les avantages éventuels des ouvrages verticaux (lorsque les contraintes de surface le permettent)	Minimiser les risques opérationnels lors de la mise en place des complétions pendant les travaux	Recommandation	Conception
Eviter de préfigurer l'utilisation (injecteur ou producteur) des ouvrages avant le développement des puits et l'estimation des connectivités en injection et en production au réservoir (essai de pompage, flowmétrie)	Maximiser les chances de succès à l'injection	Recommandation	Conception
Privilégier des architectures similaires des puits d'un doublet	Minimiser les désavantages en injection par rapport à la production	Recommandation	Conception
Dimensionner les crépines et massifs filtrants de façon à être compatible avec l'injection et la production (inversion des flux) dans chaque ouvrage	Minimiser les risques de colmatage et de déstabilisation des formations du proche puits lors du nettoyage des ouvrages et permettre les inversions de flux ponctuelles si nécessaire	Recommandation	Conception
Dimensionner les crépines et massifs filtrants en accord avec la granulométrie du réservoir, les conditions d'exploitation et la structure du puits	Obtenir le débit requis en permettant une filtration efficace, des pertes de charges minimale. Eviter la déstabilisation des formations du proche puits	Bonne pratique, (Hamm et al., 2019)	Conception
Prévoir la possibilité de mettre en place des aménagements en surface et dans l'ouvrage injecteur pour faciliter les opérations de nettoyage et retro-lavage	Nettoyer ou décolmater les puits et formations proche puits en limitant les interruptions d'exploitation	Recommandation	Conception
Réaliser les travaux par une entreprise expérimentée dans le secteur de la géothermie	Minimiser les risques opérationnels et techniques et améliorer la qualité des opérations	Bonne pratique	Conception Travaux Développement
Prévoir l'intervention d'une ingénierie spécialisée pour la gestion des fluides de forage et pour les essais hydrogéologiques	Minimiser les risques opérationnels et techniques et améliorer la qualité des opérations	Bonne pratique	Travaux Développement
Contrôler la réalisation des travaux et le placement des crépines et des massifs filtrants dans le puits par contrôle vidéo	Assurer la filtration des particules et permettre la mise en place des nettoyages et développements des puits	Bonne pratique	Travaux

Tableau 26 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour la conception et la réalisation des travaux de forages des opérations à l'Albien et au Néocomien.

5.2. PRÉCONISATIONS RELATIVES À LA CARACTÉRISATION DU RÉSERVOIR, AU DÉVELOPPEMENT DES PUIITS ET AUX ESSAIS DE POMPAGE

5.2.1. Caractérisation du réservoir

Les étapes de caractérisation du réservoir et du fluide géothermal sont primordiales pour l'exploration, l'amélioration des connaissances et l'exploitation optimale de la ressource. Il s'agit, en fin de travaux de forage, de caractériser la géologie et la productivité des réservoirs au niveau de chaque ouvrage.

Dans le cas des formations de l'Albien et du Néocomien, la caractérisation doit permettre d'identifier la lithologie du réservoir (*i.e.* les alternances de niveaux argileux et sableux, plus ou moins perméables), grâce aux diagraphies type Gamma-Ray (GR), Neutron porosité, de potentiel spontané ou autres. Elle doit également permettre de définir les caractéristiques intrinsèques du réservoir et du fluide géothermal (*i.e.* localiser les niveaux producteurs, leur épaisseur et leur contribution au débit, la température et la pression du réservoir, la conductivité du fluide), grâce aux diagraphies de production (débitmètre avec outil micro-moulinet ou flowmétrie) et au recueil d'échantillons.

Les **bonnes pratiques en matière de caractérisation des réservoirs de géothermie** sont détaillées dans les fiches de bonnes pratiques relatives aux diagraphies (rapport BRGM/RP-65443-FR, (Hamm *et al.*, 2019)).

Pour être représentatives, les diagraphies de production doivent être réalisées à un débit proche du débit d'exploitation. Il est recommandé de mener ces essais une première fois avant le développement des ouvrages à des débits faibles, puis une seconde fois en post-développement, à des débits proches de ceux prévus en exploitation. L'objectif est alors de pouvoir identifier, avec une plus grande fiabilité, les niveaux producteurs et les vitesses d'entraînement, à l'entrée des crépines.

5.2.2. Préconisations pour le développement des puits

Les complétions de type crépines et massif filtrant utilisées pour maintenir et filtrer les aquifères argilo-sableux, tels que l'Albien et le Néocomien, nécessitent un développement différent de ceux mis en place dans les forages captant des aquifères carbonatés (e.g. Dogger). Les principaux objectifs du développement dans ces aquifères clastiques sont, d'une part, de stabiliser la formation et le massif filtrant (*i.e.* tassement du massif), afin d'assurer l'efficacité de filtration au puits en prenant en compte la granulométrie et la lithologie des formations traversées, mais aussi d'augmenter la connectivité entre le puits et le réservoir.

Les bonnes pratiques pour le développement de puits dans les aquifères argilo-sableux de l'Albien et du Néocomien, telles que détaillées dans les fiches éditées (Hamm *et al.*, 2019), sont les suivantes :

- le développement doit se faire de façon progressive, afin de finaliser la mise en place du gravier ;
- la première phase consiste en la mise en eau du puits par air-lift :
 - o les débits sont alors assez faibles, autour de 20 m³/h,
 - o la procédure se déroule pendant environ 12 ou 24 h, dans le cas de massif de graviers ;

- la deuxième étape correspond à un développement un peu plus conséquent du puits par air-lift, avec :
 - un pompage par air-lift à paliers de débits croissants (de 30 m³/h environ jusqu'au débit maximum de l'air-lift) et, entre chaque palier, un contrôle de turbidité afin d'atteindre la production d'une eau suffisamment claire, avant de passer au palier de débit suivant,
 - une stimulation mécanique pour favoriser le tassement du massif de graviers ou la mise en place des éléments de filtration pour les crépines auto-gravillonnées par soufflage, pistonage ou pompage alterné par exemple,
 - un nettoyage du puits par injection de solvant chimique (hexa-méta-phosphates et désinfection du puits avec bactéricides), plusieurs fois si nécessaire,
 - la reprise du pompage de développement par air-lift, au débit maximum de l'air-lift, pendant environ 24 h ou plus si nécessaire.

À noter : la procédure peut être répétée dans le cas où la turbidité reste trop élevée au débit maximal de pompage par air-lift (au-delà de 10 NTU ou MS > 40 mg/l). Ce débit maximal devrait être supérieur au débit d'exploitation ; cependant, la limitation de puissance des pompes par air-lift ne permet généralement pas d'atteindre les débits d'exploitation ;

- le contrôle du bon fonctionnement de cette étape du développement du puits se fait par contrôle de la turbidité des eaux produites et par une estimation du gain de productivité du forage ;
 - le contrôle du niveau de graviers résiduel doit également être fait et un apport complémentaire de graviers peut alors être nécessaire, afin de conserver un volume d'au moins 10 % de volume du massif filtrant au-dessus des crépines. Un contrôle visuel par passage caméra est le plus favorable. Des ponts peuvent en effet se mettre en place, lors de la disposition du gravier, derrière les crépines qui entraîne alors une mauvaise disposition du massif filtrant ;
- la troisième étape du développement du puits correspond à la poursuite des opérations par pompage d'exhaure par paliers progressifs de débit (e.g. 50, puis 100, puis 150, puis 200 m³/h jusqu'au débit maximal de production majoré de 10 %) :
 - entre les paliers, le contrôle de la turbidité est réalisé en surface et le palier de production est maintenu jusqu'à obtenir un eau claire (NTU inférieure à 4 ou MS inférieur à 15 mg/l), avant de pouvoir passer au palier supérieur,
 - le contrôle du bon déroulement de ces opérations se fait par estimation du gain de productivité par analyse de l'essai par paliers (*i.e.* mesures de pression ou rabattement sur une même durée pour différents paliers de débit pour obtenir les courbes caractéristiques du puits et sa productivité),
 - il est recommandé de réaliser les essais par paliers avec, au minimum, 4 paliers d'une durée correspondant au moins à cinq fois le volume du puits rapporté au débit maximal, arrondie à la demi-heure supérieure, et avec une incrémentation des paliers de débits égale à 1/4 du débit maximum de production prévu,
 - le contrôle du bon déroulement de ces opérations permettant de vérifier l'état des crépines et si un nettoyage éventuel des sédiments par air-lift en fond de puits est nécessaire, grâce à un passage caméra.

À noter : si les résultats des essais par paliers montrent un gain limité, les opérations de développement étant insuffisantes devront être reprises, depuis le début.

La Figure 39 présente l'effet du développement sur ce type de formation, avec la mise en place de crépines pré-gravillonnées.

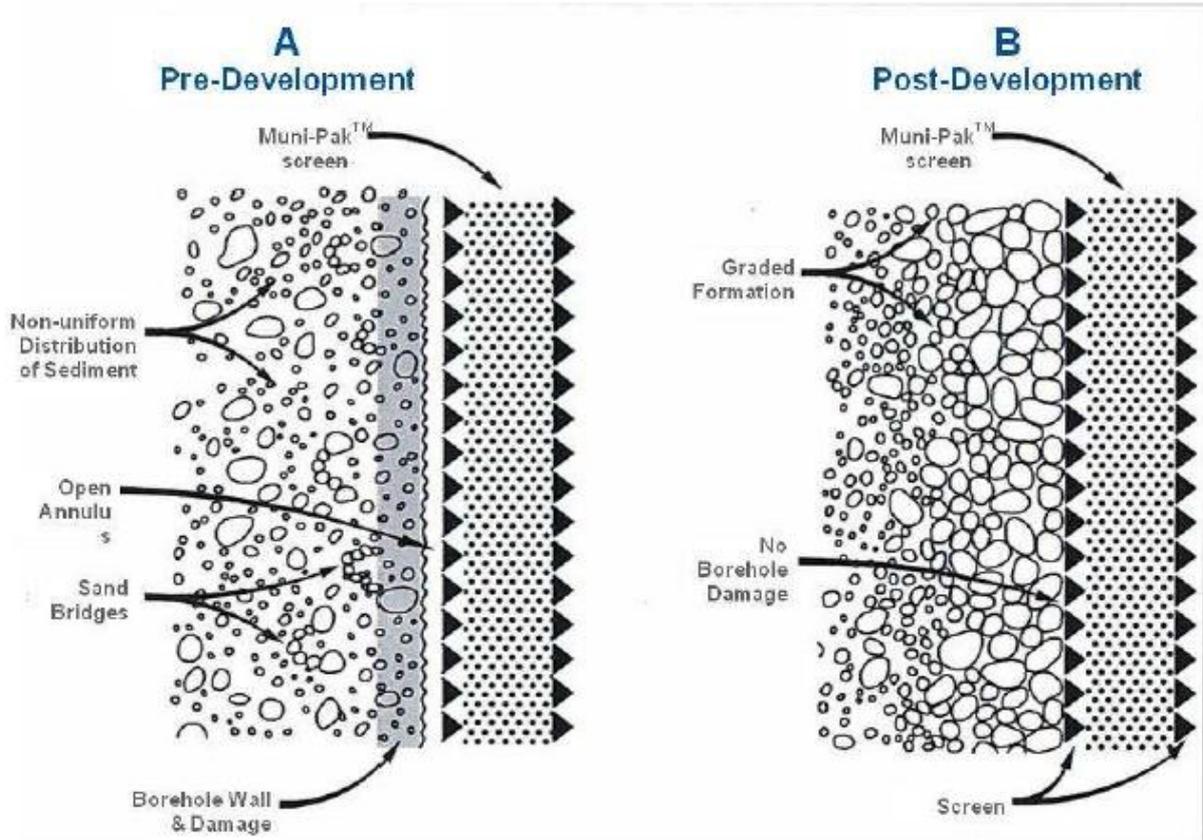


Figure 39 : Illustration de l'effet d'un développement complet du puits sur la formation au niveau du proche puits (source : présentation des crépines pré-gravillonnées de type Johnson)

De façon générale, il convient de privilégier des phases de développement longues, avec des montées en débit progressives et des paliers de durée croissante. Le suivi de l'évolution de la charge particulaire et de la turbidité des eaux produites permet de valider le bon déroulement des différentes étapes du développement (obtenir une eau claire), mais aussi de caractériser l'évolution de la quantité de particules avec les débits, et donc adapter les vitesses de production et d'injection afin de minimiser la migration des particules et leur production, avec le fluide géothermique. Il peut être intéressant de réaliser un comptage particulaire en fin de développement des forages pour identifier l'efficacité des opérations.

Il convient également de rejeter les eaux de pompage vers les canalisations de surface (eau usée), lors du développement des ouvrages à l'Albien et au Néocomien. En effet, en début de développement, les eaux sont chargées en particules et il est fortement conseillé de ne pas les rejeter au niveau du puits d'injection pour éviter tout colmatage. Il en est de même lors des phases d'essai de production, de mise en service ou de nettoyage d'un puits. Lors des essais de réinjection, il convient de contrôler la turbidité des eaux avant leur réinjection dans le réservoir.

La réalisation d'une diaggraphie de production (flowmétrique) en fin de développement, à débit proche de celui d'exploitation envisagé, est fortement recommandée. En effet, cette mesure permet d'estimer les hauteurs utiles à l'écoulement, qui seront *a priori* observées en exploitation (au débit nominal ou proche), et donc d'estimer les vitesses d'entraînement à l'entrée des crépines pour de tels débits. Il convient alors de comparer les valeurs obtenues à la vitesse d'entrée des crépines, généralement admise par la profession, de 1 cm/s (Solages, 1979), au-delà de laquelle la stabilité des formations du proche puits n'est plus assurée. Dans le cas d'un dépassement de cette valeur seuil pour le débit nominal, il conviendra de poursuivre les

investigations pour s'assurer de ne pas causer de dommage à la formation et entraîner des particules fines, et risquer de colmater les ouvrages ou d'adapter les débits d'exploitation. Ces calculs peuvent aussi être estimés de façon théorique, lors du dimensionnement des complétions en amont, puis validés après le développement des ouvrages.

5.2.3. Préconisations pour la réalisation des essais de pompage

Les bonnes pratiques relatives aux essais de pompage des opérations à l'Albien et au Néocomien sont détaillées dans la fiche spécifique éditée (Hamm et al., 2019).

Globalement, les principales préconisations à suivre sont les suivantes :

- attendre la recompression de l'aquifère après le développement des ouvrages (généralement de 12 h), avant de débiter les essais ;
- réaliser une phase de production suivie d'une phase de remontée en pression d'une durée de 72 h chacune ;
- utiliser une pompe descendue dans le puits ;
- réaliser la production à un débit aussi proche que possible du débit maximal visé.

Durant cette phase, il est recommandé de suivre les rejets des eaux de production pour évaluer la turbidité et la nature des particules qui peuvent être produites, et leur évolution, avec la durée du pompage. La présence de particules fines doit être limitée si le développement de l'ouvrage a été mené de façon optimale.

Avant les essais d'injection, il est recommandé de pratiquer une filtration des eaux en cohérence avec la taille des particules pouvant se trouver dans les eaux à réinjecter.

Notons que l'ensemble des outils utilisés pour les différentes phases devront être désinfectés avant d'être introduits dans les ouvrages.

Le Tableau 27 ci-dessous présente une synthèse des bonnes pratiques, recommandations et investigations complémentaires à mettre en place lors des phases de caractérisation du réservoir, de développement des puits et des essais de pompage.

Mesures	Objectifs	Type	Phase d'application
Prévoir la possibilité de mettre en place des aménagements en surface et dans l'ouvrage injecteur pour faciliter les opérations de nettoyage et retro-lavage	Nettoyer ou décolmater les puits et formations proche puits en limitant les interruptions d'exploitation	Recommandation	Conception
Contrôler la réalisation des travaux et le placement des crépines et des massifs filtrants dans le puits par contrôle vidéo	Assurer la filtration des particules et permettre la mise en place des nettoyages et développements des puits	Bonne pratique	Travaux
Acquérir des données supplémentaires au niveau des forages d'exploitation par digraphies, prélèvements d'échantillon et diagraphie de formation (micro-moulinet) avant le développement des puits	Améliorer la caractérisation géologique du réservoir, des fines en suspensions, estimer la productivité du réservoir (à faible débit), des températures et pressions du réservoir, la nature des fluides sur chaque ouvrage	Bonne pratique Investigation complémentaire	Avant développement
Respecter les bonnes pratiques en matière de développement des ouvrages et privilégier des phases de développement longues avec une montée en débit progressive et des paliers de plus en plus long	Stabiliser la formation et le massif filtrant, augmenter la connectivité entre le puits et le réservoir, optimiser la filtration des fines au niveau de la colonne captante	Bonne pratique, (Hamm et al., 2019)	Développement
Caractériser l'évolution de la charge particulaire mobilisée, mesurer la turbidité et son évolution en fonction des débits de production en phase de développement et d'essai de nappe	Améliorer la caractérisation des fines (nature, quantité, origine de leur mobilisation) et adapter les vitesses et débits d'exploitation pour minimiser leur production	Investigation complémentaire	Développement
Rejeter les eaux de pompage vers les canalisations lors du développement, des essais et de la mise en service de la boucle ou lors des opérations de réhabilitation et nettoyage des puits	Eviter le colmatage du puits d'injection en rejetant des eaux chargées en fines dans le puits	Recommandation	Développement Nettoyage Réhabilitation
Contrôler l'efficacité des opérations de développement par un passage caméra (gravier existant derrière crépines, limiter autant que possible les traces de fines) et par analyse de la turbidité ou comptage particulaire des eaux en fin de développement	Maximiser les chances de succès de la filtration par la colonne captante et caractériser les eaux et leur contenu en particules en suspension	Recommandation	Développement
Réaliser une diagraphie de formation (micro-moulinet) à débit nominal en fin de développement	Caractériser les intervalles contribuant aux écoulements et estimer les vitesses d'entraînement à l'entrée des crépines en condition d'exploitation	Investigation complémentaire	Développement
Respecter les bonnes pratiques en matière d'essai de formation (ou essai de nappe) de longue durée et notamment les durées de re-compression des aquifères après développement, durées de pompage/injection et de remontée en pression et débits atteints	Caractériser les paramètres hydrodynamiques dans les environs des ouvrages	Bonne pratique, (Hamm et al., 2019)	Essai de formation
Contrôler la turbidité des eaux produites durant les essais de longue durée et caractériser la charge particulaire à plusieurs étapes des essais	S'assurer de l'efficacité du développement des ouvrages	Recommandation Investigation supplémentaire	Essai de formation
Filtrer les eaux avant leur réinjection durant les essais d'injection	Eviter le colmatage du puits d'injection en rejetant des eaux chargées en fines dans le puits	Recommandation	Essai de formation
Estimer les vitesses d'entraînement à l'entrée des crépines pour la hauteur utile à l'écoulement (à débit proche du débit nominal idéalement) au puits en fonction du débit nominal envisagé et des débits testés en phase de développement et d'essai de nappe	Eviter la déstabilisation les formations réservoir du proche puits et adapter les débits d'exploitation	Recommandation Investigation supplémentaire	Essai de formation

Tableau 27 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour la caractérisation du réservoir, le développement des puits et les essais de pompage des opérations à l'Albien et au Néocomien.

5.3. PRÉCONISATIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION DES DOUBLETS GÉOTHERMIQUES

5.3.1. Préconisations générales

Avant la mise en service du doublet, il convient de procéder au nettoyage des canalisations de liaison à l'eau propre pour évacuer les particules pouvant être présentes et éviter le rejet d'une eau chargée dans le puits de réinjection.

La recommandation majeure pour la phase d'exploitation porte sur l'adéquation des débits d'exploitation maximum admissibles aux vitesses critiques des ouvrages (estimés lors des essais de longue durée), aux rabattements admissibles et aux vitesses d'entrée des crépines (estimées pour les hauteurs utiles à l'écoulement en condition d'exploitation réelle *i.e.* au débit nominal). Cette vérification permet, d'une part, de réduire les déstabilisations et forces d'érosion du réservoir, dans l'environnement proche du puits de production, et donc de limiter le volume de particules fines mobilisées. Elle permet aussi de limiter le rabattement dans le puits de production, et ainsi de réduire l'oxydation potentielle des eaux.

5.3.2. Paramètres bactériologiques, hydrogéologiques, physico-chimiques, charge particulaire de l'eau : définir l'état initial de l'exploitation

Une bonne connaissance des différents paramètres de l'exploitation géothermale est fondamentale pour évaluer le risque de colmatage et de baisse d'injectivité. Un état initial de référence (état zéro de l'exploitation) des paramètres physico-chimiques (y compris la charge particulaire) et bactériologiques de l'eau, hydrodynamiques du réservoir et des ouvrages, est un élément clef pour la compréhension du système.

Les paramètres à définir sont alors les suivants :

- analyse physico-chimique et bactériologique : température, pH, potentiel redox, oxygène dissous, conductivité, éléments majeurs et traces dissous et totaux, paramètres organiques, bactéries ferri-réductrices et ferro-oxydantes ;
- analyse particulaire : volume de particules en suspension dans l'eau (MES), analyse granulométrique des particules (comptage optique ISO 21501-3), analyse de la nature des particules ;
- analyse hydrogéologique et hydrodynamique : granulométrie des cuttings de forage, diagraphie des formations (lithologie, hauteur du réservoir, géométrie), diagraphie de production (distribution des venues d'eau), niveau statique et dynamique, débits spécifiques en pompage et en injection, pertes de charges, vitesses d'écoulement à l'entrée des crépines, perméabilité, transmissivité après développements et après essais de formation de longue durée, débits critiques.

Il est primordial de réaliser les analyses en documentant les protocoles et normes appliqués, notamment lors de prélèvements d'échantillons, pour reproduire les mesures, lors du suivi des installations et des ouvrages, dans des conditions similaires, et comparer aisément les résultats. La mesure de certains paramètres, à différents débits (e.g. charge particulaire, micro-moulinet), constitue également un élément de compréhension du risque de colmatage des puits et des paramètres d'exploitation.

5.3.3. Suivi de l'exploitation

Le suivi des paramètres hydrodynamiques en phase d'exploitation permet d'apprécier les variations des performances du doublet, au cours de l'exploitation et des phases d'interruptions, et de détecter les anomalies de fonctionnement, à partir de l'état zéro défini en fin d'essais. Il est recommandé de procéder au suivi des températures, des débits, des pressions de production et d'injection, des pressions en amont et à l'aval des filtres et des échangeurs et des niveaux d'eau des forages de pompage et de réinjection.

De la même façon, le suivi de la qualité du fluide géothermal par des analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de production et d'injection, ainsi que le suivi de la charge particulaire est fortement recommandé. Il comprend la mesure des teneurs en éléments majeurs, du pH et du potentiel redox, de la conductivité, des températures, l'analyse bactériologique (ferri-réductrices et ferro-oxydantes), l'analyse de la charge particulaire par comptage et par analyse de la granulométrie des particules. La fréquence des mesures peut être adaptée en fonction de la situation et des suivis hydrodynamiques réalisés par ailleurs.

En fonction des observations, il est alors possible d'ajuster les débits, lorsqu'une dérive ou une baisse de performance est identifiée, en cours d'exploitation. Le suivi permet également d'identifier les impacts, positifs ou négatifs, sur les performances hydrauliques des ouvrages des phases de nettoyage, d'inversion de flux et des phases d'arrêt. L'expérience a montré que les colmatages peuvent être très rapides et provoquer des dommages, qui semblent irréversibles. Il convient, donc, de suivre avec attention les performances des doublets *via* le suivi mis en place.

L'identification de l'origine des phénomènes de colmatage est potentiellement plus aisée avec le suivi des différents paramètres. Le suivi permet d'appréhender les besoins de réhabilitation ou de régénération des ouvrages.

Cependant, la vitesse de décroissance des performances, après chaque phase de régénération des puits, peut être plus ou moins rapide suivant les ouvrages, et évoluer entre deux phases. Des opérations préventives de régénération peuvent alors s'avérer nécessaires, avant même les premiers signes de colmatage (e.g. augmentation des pressions d'injection), et ceci afin d'éviter d'endommager les ouvrages de façon irréversible.

Le contrôle visuel par inspection vidéo dans les ouvrages apporte des informations additionnelles, notamment sur la présence de voiles bactériens ou de particules déposés au niveau du massif filtrant et des crépines des ouvrages. Le cas échéant, des analyses en laboratoire pourront être envisagées pour caractériser la nature des dépôts et les solutions à mettre en place (e.g. traitement bactéricide, curage).

Le suivi pourra être fait grâce à la mise en place de capteurs, dans les ouvrages et dans les équipements de surface, et les prélèvements pourront être réalisés par l'intermédiaire de piquage en tête de forage.

5.3.4. Rétro-lavage

Définition

Le principe du rétro-lavage des ouvrages d'injection a été décrit pour les opérations de géothermie de surface dans les sédiments non consolidés (Snijders *et al.*, 2016). Il consiste en **l'inversion du flux dans l'ouvrage d'injection, afin de favoriser la mobilisation des particules provenant du puits de production et ayant colmaté les crépines et massifs filtrants du puits d'injection, et les pores du réservoir dans l'environnement du proche puits**. C'est notamment le système mis en place dans les installations géothermales de stockage

de chaleur en aquifère, où les puits sont réversibles en production et en injection pour permettre la production de chaleur en hiver, et la production de froid en été. Le système des Tours AGF était initialement dimensionné de la sorte, mais n'a fonctionné selon ce protocole que très peu de temps. Le principe du fonctionnement est illustré en Figure 40.

L'opération de rétro-lavage peut être mise en place, de façon corrective, une fois que le colmatage particulière a été identifié dans l'ouvrage d'injection, ou bien de façon préventive à une fréquence donnée, afin de maintenir les performances en injection de façon continue.

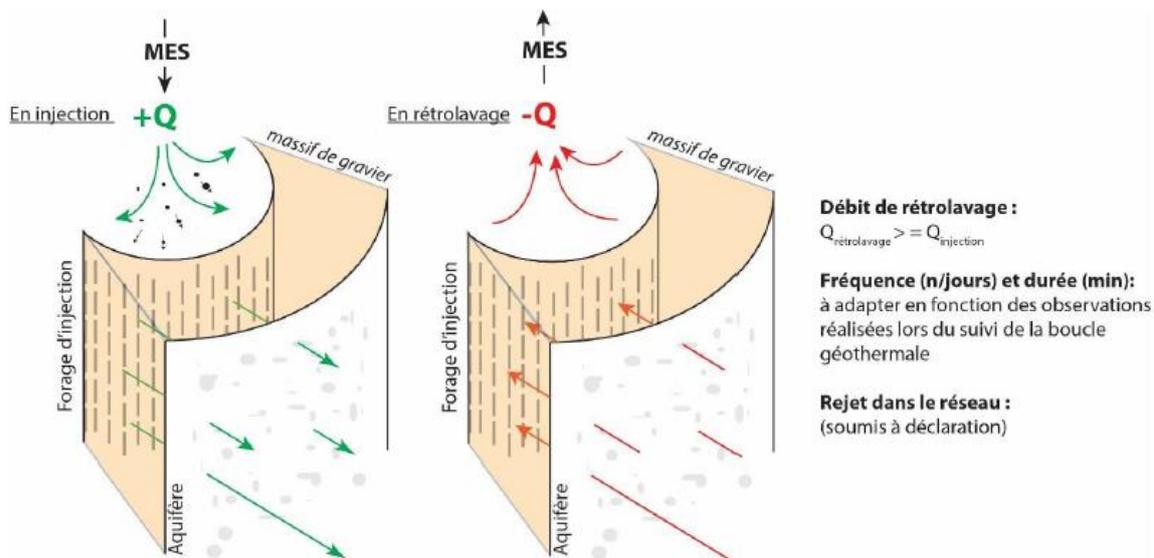


Figure 40 : Principe de fonctionnement du dispositif de rétro-lavage (Burté, 2019).

Moyen mis en œuvre pour l'inversion de flux

D'un point de vue technique, l'inversion de flux peut être réalisée par pompage assisté à l'air-lift (en faisant toutefois attention à la problématique d'oxydation de la boucle géothermale), ou par pompage de production.

Des aménagements en surface et dans les puits d'injection peuvent être nécessaires pour la réalisation du rétro-lavage et suivant les techniques mises en place. Le volume d'eau produit lors de ces phases doit être rejeté dans les canalisations. Au niveau du forage, la mise en place des pompes ou tube d'injection d'air dans le puits requiert une chambre de pompage ou un diamètre de tubage adapté aux pompes de production disponibles dans l'industrie.

Il est également nécessaire de mettre en place une armoire électrique en surface pour l'alimentation de la pompe.

Préconisations

L'inversion de flux doit se faire **à un débit équivalent ou supérieur, de préférence, au débit d'exploitation (la marge de + 10 % est généralement admise)**. Il est primordial d'**éviter les variations brutales de pression** (surpression ou sous-pression), en particulier les arrêts brusques pouvant déstabiliser les formations et être à l'origine de colmatages additionnels. La montée en débit se fait alors de façon progressive. Une vigilance particulière devra être apportée au démarrage de la production assistée par air-lift.

Pour que l'inversion puisse être mise en place, les ouvrages devront être équipés de compléments adaptés (cf. section 5.1). Dans le cas contraire, l'opération de nettoyage peut engendrer des surpressions, à l'entrée des crépines, et déstabiliser fortement l'environnement du puits.

Les eaux produites ne pourront être réinjectées dans l'aquifère car potentiellement chargées en particules fines. Des autorisations devront être formulées auprès de la DRIEE (pour les opérations à l'Albien et au Néocomien en Ile-de-France) pour permettre le rejet des eaux en surface.

La fréquence, le débit et la durée des phases de rétro-lavage devront être adaptés en fonction des observations sur site et de l'évolution des paramètres hydrodynamiques du forage (pression d'injection, débits et niveau dynamique). Des ajustements seront très probablement nécessaires d'une phase à l'autre pour établir un protocole en accord avec les besoins d'un puits d'injection et d'une exploitation donnée.

Expériences

Une publication (Burté, 2019) présente le retour d'expérience d'une opération de géothermie, dans l'aquifère du Lutétien, en Île-de-France, où le rétro-lavage a été mis en œuvre. Le problème de colmatage a été solutionné, suite à plusieurs essais d'inversion de flux dans le forage de production. L'ouvrage d'injection a alors pu, d'une part, retrouver sa fonctionnalité et les performances ont été maintenues sur le long terme, grâce à un cycle de rétro-lavage de deux fois par semaine, pendant une heure, à un débit de 5 m³/h, dans un premier temps, puis d'une fois par semaine, à 20 m³/h, pendant une heure. Le débit spécifique est alors stabilisé et l'exploitation ne nécessite pas d'opérations lourdes et coûteuses de réhabilitation.

Des auteurs (Snijders et al., 2016) recommandent, dans leurs travaux, de réaliser des inversions de flux, à minima, deux fois par an, pendant une heure, à débit maximal, à la fin de la période hivernale et à la fin de l'été.

Le rétro-lavage a été réalisé avec succès au niveau des opérations de Clichy-Batignolles, puisque cette opération a permis de restaurer l'injectivité dans le puits ZCB P2 et de maintenir les performances du doublet de façon préventive. Pour cette exploitation, l'inversion de flux s'est faite dans un premier temps *via* des pistonages par injection d'air. Les débits atteints ont été estimés autour de 80 m³/h. Cette première phase ne semble pas avoir eu d'effet immédiat sur la performance de l'ouvrage. L'inversion de flux a donc été reconduite *via* une série de pompages par paliers de débits croissants entre 120 à 200 m³/h pendant quelques heures, avec des phases de démarrage et d'arrêt de la pompe.

Cette seconde phase **d'inversion de flux a permis de restaurer, d'une part, la productivité de l'ouvrage, mais aussi ses performances en injection**. Un essai d'injection a, en effet, confirmé la restauration des performances du puits, avec une pression, en tête de puits, de 3,8 bar pour un débit maximal de 200 m³/h, valeurs similaires à celles observées lors de la mise en service du doublet en 2016 (*i.e.* indice d'injectivité autour de 4 m³/h/m). Depuis la mise en place de cette opération de rétro-lavage, en octobre 2018, l'exploitation semble fonctionner sans encombre au débit nominal de 180 m³/h (état en décembre 2019). L'installation d'une pompe à demeure, dans l'ouvrage d'injection, peut être une solution permettant de limiter la durée des interventions sur le doublet, et donc les arrêts d'exploitation si de nouvelles inversions de flux s'avèrent nécessaires.

Les rétro-lavages mis en place au niveau des opérations d'Issy-les-Moulineaux et du Plessis-Robinson, lors de la mise en production assistée par air-lift, n'ont en revanche pas permis de restaurer les performances des ouvrages. Dans le cas de l'opération d'Issy-les-Moulineaux, il est possible que les particules aient migré plus loin dans le réservoir et ne soient donc plus

mobilisables *via* ce type d'action hydromécanique. Les opérations de nettoyage successives du puits injecteur de l'exploitation du Plessis-Robinson ont pu, quant à elles, aggraver l'état de ce puits par la déstabilisation du proche réservoir du fait des crépines inadaptées (voir section 3.3.4).

L'effet positif du rétro-lavage sur les performances des doublets de l'Albien et du Néocomien, et plus généralement, sur les exploitations des aquifères sableux reste donc à démontrer, notamment sur la durée. Peu d'opérations de ce type ont été mises en œuvre actuellement et le retour d'expérience se fera donc au fur et à mesure des essais.

Cette mesure semble être rapide à mettre en place et peu coûteuse (matériel requis et temps d'interruption). Les protocoles de mise en place et le déroulement des opérations (débit, fréquence, durée) devront, très certainement, être ajustés en fonction des suivis d'exploitations et des observations sur chaque site, ou être adaptés sur certains sites en fonction des problèmes rencontrés au cas par cas.

5.3.5. Filtration

La production de particules fines dans les opérations de géothermie à l'Albien et au Néocomien semble être, d'après le retour d'expérience, un élément difficile à limiter, malgré la mise en place des bonnes pratiques de la conception au développement et essais de formation. Il est donc essentiel de limiter la réinjection de ces particules dans le puits d'injection, et d'adapter les systèmes de filtration en surface.

Les bonnes pratiques sur la filtration des eaux géothermales en surface ont été définies dans une fiche technique (Hamm *et al.*, 2019).

Les particules responsables des colmatages ont un diamètre variable pouvant atteindre, sur certaines opérations, des tailles inférieures à 10 μm . Les filtrations généralement mises en place sur les opérations à l'Albien et au Néocomien sont de type cyclonique et à tamis, entre 100 μm et 130 μm . Elles ne sont donc pas adaptées au risque de colmatage particulaire identifié. Les opérations de Paris-Saclay ont mis en place un système de filtre à poche, plus fin, et sur trois étages de 100 μm , 5 μm et 1 μm .

Les règles générales de dimensionnement des filtres consistent (Hamm *et al.*, 2019) à prendre en compte le débit d'exploitation, la pression de service, la concentration en matière en suspension, la distribution granulométrique des particules, la compatibilité physico-chimique des matériaux du filtre, avec les équipements du doublet, les propriétés hydrauliques au niveau de l'injecteur. Pour les aquifères de l'Albien et du Néocomien, les débits d'exploitation sont généralement entre 0 et 220 m^3/h , les pressions de service inférieures à 5 bar, les températures entre 20 et 35 °C, les pertes de charges des éléments filtrants inférieure à 1 bar et la fréquence de nettoyage des filtres hebdomadaire.

Il existe plusieurs types de filtrations. On retrouve sur les opérations à l'Albien et au Néocomien, les filtres à tamis qui sont généralement robustes et de coûts réduits, mais dont l'efficacité se limite aux tailles de particules de 50 à 500 μm (*i.e.* des particules assez grossières) et nécessite un nettoyage fréquent, qui peut être complexe. On trouve également des filtres cycloniques, qui utilisent la force centrifuge pour faciliter la séparation de l'eau avec des particules grossières, avant son passage dans un filtre de maille 250 μm . Bien que plus onéreux, ils présentent de nombreux avantages, dont la possibilité de nettoyer les tamis par vidange, sans arrêter l'exploitation.

Les filtres développés par la société AMIAD proposent une filtration en profondeur à nettoyage automatique (filtre AMF, Figure 41). Il s'agit de microfibres textiles identiques à celles composant les filtres à cartouches, qui retiennent les particules au fur et à mesure du passage de l'eau. Les

fines s'accumulent sur et dans les microfibrilles et créent, ainsi, une différence de pression entre la partie amont et aval. Une unité de contrôle déclenche ensuite les cycles de nettoyage pour un différentiel de pression ou une fréquence donnée. L'investissement est important (entre 300 et 500 k€), mais doit permettre de limiter l'impact sur l'exploitation, avec moins d'intervention sur les filtres. Les seuils de filtration sont également adaptés aux granulométries des particules produites, entre 2 et 20 μm .

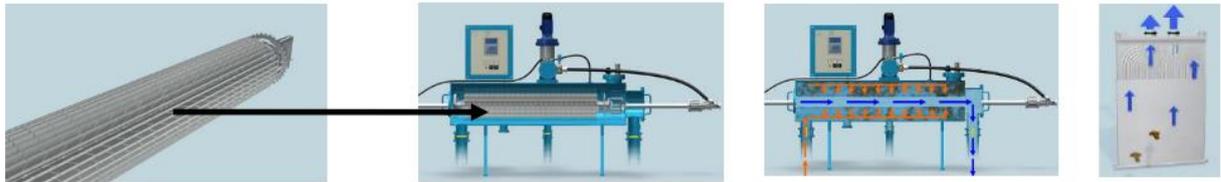


Figure 41 : Principe de fonctionnement des filtres microfibrilles AMIAD AMF (d'après AMIAD).

Une filtration à travers un média filtrant de bille de verre peut être envisagée. Cette technologie présente l'avantage d'être adaptée à la granulométrie des particules produites (seuil de filtration de 5 μm), mais le dispositif doit être nettoyé régulièrement et demande donc une réduction des débits de production durant les phases de lavage. L'investissement est moindre que pour les filtres microfibrilles (estimé autour de 200 à 300 k€).

Le Tableau 28 ci-dessous présente la synthèse des préconisations relatives à l'exploitation des doublets géothermiques pour l'exploitation des aquifères sablo-argileux de l'Albien et du Néocomien.

Mesures	Objectifs	Type	Phase d'application
Nettoyer les canalisations de liaison à l'eau propre avant la mise en service de la boucle géothermale et rejeter à l'exutoire en surface	Évacuer les fines pouvant être présentes et éviter le rejet d'une eau chargée en fines dans le puits de réinjection	Recommandation	Exploitation
Adapter les débits maximum admissibles en exploitation en fonction du rabattement, des vitesses critiques et des vitesses d'entrée de crépines estimées pour chaque puits	Limiter les déstabilisations et forces d'érosion dans l'environnement du puits de production et la mobilisation de fines en suspension. Limiter le rabattement dans le forage de production	Recommandation	Exploitation
Définir l'état initial pour les paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau, la charge particulaire, les paramètres hydrodynamiques du réservoir et caractéristiques de la connexion entre les ouvrages et le réservoir	Établir les performances de l'ouvrage et avoir une référence pour identifier d'éventuelles dérives liées au colmatage progressif des ouvrages	Recommandation Investigation supplémentaire	Exploitation
Assurer un suivi des ouvrages et de l'exploitation (physico-chimique, charge particulaire, bactériologique, hydrodynamique)	Identifier les dérives potentielles et les impacts des réhabilitations (nettoyage, inversion de flux) sur les performances en comparant les mesures à l'état initial des ouvrages	Recommandation Investigation supplémentaire	Exploitation
Mettre en place des phases de rétro-lavage ou inversion de flux au niveau des puits d'injection et adapter les installations dans le puits et en surface (armoie électrique, pompe ou pistonage, colonne d'exhaure, rejet des eaux) pour renouveler les opérations en limitant les interruptions d'exploitation	Maintenir les performances du doublet en mobilisant les fines présentes au niveau des crépines, massifs filtrant et pores du réservoir proche du puits au niveau des ouvrages d'injection (préventif et correctif)	Recommandation Investigation supplémentaire	Exploitation
Mettre en place une filtration en surface qui soit adaptée à la granulométrie des fines, aux débits d'exploitation, aux pressions considérées, aux équipements du doublet, aux propriétés hydrauliques du réservoir au puits d'injection et aux pertes de charges admissibles	Filtrer les eaux de production avant leur réinjection vers le puits injecteur et éviter le colmatage par des fines de diamètre inférieur ou égale à 10 µm. Limiter les pertes de charges dû à la filtration	Recommandation Investigation supplémentaire	Exploitation

Tableau 28 : Synthèse des bonnes pratiques et recommandations pour l'exploitation des opérations à l'Albien et au Néocomien.

6. Conclusions et perspectives

L'origine des colmatages des opérations à l'Albien et au Néocomien semble être majoritairement due à la présence de particules dans les ouvrages en provenance des ouvrages producteurs et au colmatage progressif des ouvrages d'injection par ces particules pouvant atteindre des tailles inférieures à 1 μm . Les difficultés d'injection ont été rencontrées, dès les phases de développement et d'essais de nappe, et se poursuivent, voire se détériorent, lors de l'exploitation des doublets.

Des recommandations et préconisations relatives à la conception des ouvrages, à la réalisation des travaux, au développement des puits, à la réalisation des essais de production et à l'exploitation des doublets ont été formulées, suite à l'analyse des opérations.

Pour les exploitations actuelles, les préconisations portent majoritairement sur (1) l'adaptation des débits d'exploitation aux débits admissibles des ouvrages (basée sur les dimensionnements des ouvrages, vitesses critiques et vitesses d'entrée de crépine), (2) la mise en place de filtrations suffisamment fines en surface, et (3) la mise en place des rétro-lavages des ouvrages d'injection (si le dimensionnement des crépines le permet).

L'effet positif du rétro-lavage sur les performances des doublets à l'Albien et au Néocomien, et plus généralement sur les exploitations des aquifères sableux, reste à démontrer, notamment sur la durée. En revanche, cette mesure semble être rapide à mettre en place et peu coûteuse, du point de vue du matériel nécessaire et du temps d'interruption des opérations. Elle a pu faire ses preuves sur le doublet de Clichy-Batignolles, et des phases de tests opérationnels pourraient être poursuivies sur ce site, et développées sur d'autres, pour vérifier l'efficacité de cette technique sur le long terme.

La poursuite des suivis des paramètres hydrauliques, physico-chimiques, bactériologiques et particuliers, au niveau des exploitations, est primordiale pour l'évaluation du risque de colmatage des ouvrages. C'est avec l'analyse de ces éléments que les diagnostics des ouvrages sont aujourd'hui possibles.

Pour les exploitations futures, outre les préconisations énumérés pour les opérations actuelles, les principales recommandations portent sur :

- la nécessité de définir l'utilisation des ouvrages (injecteur ou producteur), seulement suite aux développements des forages et à l'estimation des connectivités en injection et en production au réservoir (essai de pompage, flowmétrie) ;
- le fait de dimensionner, en conséquence, les crépines et massifs filtrants de façon à être compatible avec l'injection et la production dans chaque ouvrage ;
- le respect des bonnes pratiques, en matière de conception des ouvrages et de dimensionnement des éléments constitutifs (diamètre, tubage, complétions) en fonction des caractéristiques des formations et conditions d'exploitation, et le respect des bonnes pratiques, en matière de développement et d'essai de pompage, en privilégiant des montées en débit progressives ;
- la possibilité d'aménager l'ouvrage injecteur et les installations en surface pour faciliter les opérations de nettoyage et rétro-lavage ;
- la réalisation des travaux par une entreprise expérimentée, dans le secteur de la géothermie, et l'intervention d'une ingénierie spécialisée pour la gestion des fluides de forage et pour les

essais hydrogéologiques, et contrôler la réalisation des travaux et le placement des crépines et des massifs filtrants dans le puits par contrôle vidéo.

Le retour d'expérience a également montré que des recherches sont en cours pour identifier les phénomènes physiques en jeu dans les baisses de performances des ouvrages en exploitation dans les formations silico-clastiques, et les solutions pérennes pour limiter ces dégradations.

Ces travaux peuvent ainsi être poursuivis, ou initiés le cas échéant, à partir de l'étude des exploitations à l'Albien et au Néocomien sur site, ou *via* des recherches en laboratoire, à partir d'échantillons prélevés au niveau des filtres ou dans les bacs d'essais et échantillons de roches. Ces travaux peuvent être réalisés aussi pour d'autres formations clastiques ciblées pour le développement de la géothermie (exemple du Bassin aquitain), afin de dérisquer les opérations de géothermie actuelles et futures, dans ce type d'environnement géologique.

Plusieurs sujets sont ainsi listés :

- caractérisation des formations des réservoirs (faciès, taille des pores, hétérogénéités, perméabilités) et des particules présentes dans le réservoir et dans les fluides de production (origine, nature, distribution des tailles, concentration) ;
- étude des seuils de vitesse de mobilisation des particules et la variation des volumes et des tailles des éléments avec l'évolution des vitesses (prenant notamment en compte les débits critiques, les vitesses d'entraînement à l'entrée des crépines, les débits d'exploitation, la structure des pores et des particules dans le réservoir - proche du puits - et leur évolution dans le temps) ;
- étude du taux de pénétration des particules en réinjection (e.g. analyse des pressions en régime transitoire, au niveau des doublets ou diagraphies) ;
- étude de la mobilisation des particules dans le réservoir ;
- étude des protocoles de rétro-lavage (durée, débit, fréquence) et de l'efficacité de la mesure sur les performances en injection des forages.

7. Bibliographie

- Barkman, J.H., Davidson, D.H., 1972. Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment. *Journal of Petroleum Technology* 24, 865–873.
- Battistelli, A., Nagy, S., 2000. Reservoir engineering assessment of low-temperature geothermal resources in the Skierniewice municipality (Poland). *Geothermics* 29, 701–721.
- Bugarel, F., Bouchot, V., 2016. Projet GUIDOCLAST Tâche 1 : retours d'expériences des opérations de géothermie profonde ciblant des réservoirs clastiques en Europe - Rapport intermédiaire, Rapport intermédiaire BRGM/RP-66040-FR.
- Bugarel, F., Bouchot, V., Jérôme, B., 2018. Projet GUIDOCLAST – Guide de bonnes pratiques pour une exploitation optimale et durable d'opérations géothermiques de basse température en réservoir argilo-gréseux ou sableux. Rapport final BRGM/RP-67113-FR.
- Burté, L., 2019. Etude des risques de colmatage et optimisation des procédés de traitement des doublets géothermiques superficiels.
- Dupaigne, T., Bault, V., Meire, B., 2019. Réalisation d'une carte piézométrique synchrone de la nappe de l'Albien et nouvelles thermométries du Bassin parisien. Rapport final BRGM/RP-68536-FR.
- Hamm, V., Bugarel, F., Giuglaris, E., Goyénèche, O., Gutierrez, A., 2019. Guide de « bonnes pratiques » sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds. Rapport final. BRGM/RP-65443-FR.
- Kabus, F., Jantsch, E., 1995. The geothermal heating plant at Waren-Papenberg: experience and modernization, in: *World Geothermal Congress* 3. pp. 2227–2232.
- Khilar, K.C., Fogler, H.S., 1998. *Migrations of Fines in Porous Media*, Springer Science & Business Media.
- Khilar, K.C., Fogler, H.S., 1983. Water sensitivity of sandstones. *Society of Petroleum Engineers Journal of AIME* 55–64.
- Mahler, A., 1995. Geothermal plant in Thisted with absorption heat pump and 10 years operation without corrosion or reinjection problems in sandstone for 15% saline water, in: *World Geothermal Congress*. pp. 2161–2166.
- Mégnyen, C., Mégnyen, F., 1980. Synthèse géologique du bassin de Paris. Mémoire du BRGM n°101.
- Perrodon, A., Zabek, J., 1990. Paris Basin, in *Interior Cratonic Basins*. AAPG Memoir 51, 633–679.
- Pujol, M., Taylor, M., Bolton, S., Bolton, G., De Roos, I.B., Disting, J., 2018. Addressing clogging risks when injecting geothermal water in sandstone aquifers: Lessons learnt in Australia. *Transactions - Geothermal Resources Council* 42, 1268–1287.
- Raoult, Y., 1999. La nappe de l'Albien dans le bassin de Paris, de nouvelles idées pour de vieilles eaux. Thèse de doctorat de l'université Paris VI.
- Rosnes, J.T., Graue, A., Lien, T., 1990. Activity of Sulfate-reducing Bacteria under Simulated Reservoir Conditions. Spe Paper No. 19429 presented at the SPE International Symposium on Formation Damage Control, 22–23 February, Lafayette, USA 231–236.
- Seguin, J.-J., Castillo, C., Arnaud, L., 2015. Modélisation des nappes de l'Albien et du Néocomien du Bassin de Paris, Rapport final BRGM/ RP-64873-FR.

- Snijders, A.L., Drijver, B.C., 2016. Open-loop heat pump and thermal energy storage systems, *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Elsevier Ltd.
- Solages, S., 1979. Calcul des ouvrages de captage - Choix et caractéristiques des colonnes de captage. Rapport final BRGM/79-SGN-727-HYD.
- Stefánsson, V., 1997. Geothermal reinjection experience. *Geothermics* 26, 99–139.
- Szita, G., 1995. The situation of harnessing geothermal energy in Hungary, in: *World Geothermal Congress*. pp. 515–518.
- Ungemach, P., 2003. Reinjection of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs. *Geothermics* 32, 743–761.
- Van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A., Stuyfzand, P.J., 2009. Cause and prevention of well bore clogging by particles. *Hydrogeology Journal* 17, 1877–1886.
- Vernoux, J.-F., Maget, P., Afzali, H., Blanchin, R., Donsimoni, M., Vairon, J., 1997. Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris, Rapport final BRGM/RP-39702-FR.
- Vetter, O.J., Kandarpa, V., 1982. *Scale Prevention and Injection Design Book*. DOE/DGE Report. US Department of Energy, Washington, DC, USA.

Annexe 1

Comptes rendus (lien pdf) des deux réunions d'échanges menées dans le cadre du projet AFIA



Orléans, le 18 décembre 2018

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteurs : C. Maurel, L. Henry	
Objet : Réunion de présentation du projet AFIA de la convention ADEME – BRGM 2019	
Date : 14 décembre 2018	Lieu : ADEME IDF, Puteaux
Participants : ADEME : Laurianne Henry, ANTEA : Nicolas Frechin, BRGM : Camille Maurel, CFG : Murielle Grange, Dalkia : Jean-Baptiste Sivery, DRIEE : Baptiste Lorenzi, Eau de Paris : Florence Soupizet et Joël Schmitt, Paris-Saclay : Nicolas Eyraud	
Absents : GPC IP, AFPG, Idex, G2H Conseil	
Diffusion : les participants, BRGM, ADEME	

Ordre du jour et présentation des projets

- Echange autour de l'étude lancée en 2019 sur les difficultés d'exploitation à l'Albien et des données nécessaires à cette étude dans le cadre de la convention entre l'ADEME nationale et le BRGM ;
- Echange sur les éléments pouvant être partagés avec l'ensemble de la filière lors du CT-GAP du 5 février.

1. Présentation du projet

- Présentation du projet par le BRGM (cf .fiche de description du projet) ;
- L'objectif de l'étude est d'initier un guide de bonne pratique utile à l'ensemble de la filière sur la conception des ouvrages et leur exploitation (e.g. fiches techniques ADEME-BRGM suite au REX sur les forages profonds et projet GUIDOCLAST pour l'exploration et l'exploitation des formations clastiques) ;
- Le BRGM va dans un premier temps identifier les informations nécessaires pour la réalisation de cette étude (REX et réflexion sur guide de bonne pratique). Une liste exhaustive sera fournie aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre afin d'initier les discussions sur l'échange de donnée et leur usage ;
- Travaux de synthèse des informations sur les 6 opérations à l'Albien/Néocomien (Tour Crystal et Mirabeau, Issy-les-Moulineaux, Plessis-Robinson, Clichy-Batignolles, Saclay-Moulon et Saclay-Polytechnique) initiés lors du projet Guidoclast et à compléter/vérifier les informations.

2. Discussion sur les opérations en cours à l'Albien/Néocomien

- **Opération de Clichy-Batignolles (Eau de Paris, ANTEA) :**

Opération de décolmatage et investigation en cours sur les causes. ANTEA précise que différentes méthodes et mesures ont été essayées pour régénérer l'ouvrage (diagraphie, caméra avant/après, micro-moulinet avant/après, analyse en surface, etc.). Il apparaît que la présence de fines est à l'origine des problématiques de colmatage rencontrés et d'augmentation de la pression d'injection. La taille critique des particules est d'environ 10µm. Le pompage simple pour ramener le débit nominal a permis d'éviter des étapes lourdes de régénération et remédier aux problèmes rencontrés. Le colmatage semble réversible. La dérive est arrivée assez vite (augmentation de pression observée entre décembre 2017 et mars 2018) mais il semble que le problème soit aujourd'hui maîtrisé (débit nominal depuis octobre 2018). A noter, plusieurs aléas sont intervenus lors de la foration et du développement du puits (coupure d'électricité sur chantier, interruption du doublet). Les crépines sont en bon état et la production est assez homogène sur la hauteur crépinée. Pas de fines dans les filtres (100µm). Actuellement la réinjection dans le puits après opération de nettoyage se fait sans rejet à l'égout et peut endommager l'ouvrage par injection de fines dans le puits (non prévue par l'arrêté).

- **Point sur la réglementation en vigueur vis-à-vis du rejet des eaux en surface (DRIEE) :**

1/2



Le 15 Janvier 2020

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteurs : Norbert Bommensatt, Camille Maurel	
Objet : Réunion d'avancement du projet AFIA de la convention ADEME – BRGM 2019 dans le cadre du CT GAP du 10 décembre 2019	
Date : 10 décembre 2019	Lieu : Caisse des dépôts Paris
Participants : Apolit Robin, SER, Audouin Olivier, CFG Services, Barranger Catherine, ANTEA, Boissavy Christian, AFGP, Bommensatt Norbert, ADEME, Charlier Elise, DRIEE, Chilliet Alain, SAF, Davaux Mélanie, GPC IP, Demolliens Antoine, Paris Saclay, Florette Claire, ADEME, Frechin Nicolas, consultant, Hamm Virginie, BRGM, Laplaige Philippe, ADEME, Maurel Camille, BRGM, Monneyron Nicolas, AFGP, Perrin Guillaume, FNCCR, Piquard Bruno, EDP, Schmidlé Bloch Virgine, AFGP, Schmitt Joël, EDP, Sivery Jean Baptiste, DALKIA	
Diffusion : les participants et leurs collaborateurs, BRGM, ADEME	

<p><u>Présentation de l'avancement de l'étude AFIA (voir support en P.J) par le BRGM suivi d'un échange.</u></p> <p><u>Réflexions sur la partie conception des ouvrages et la représentativité des cuttings issus des forages pour adapter le slot de crépine.</u></p> <p>Le problème du délai de livraison d'une crépine a façon (10 semaines) n'est pas compatible avec les contraintes de chantier (sauf plusieurs puits : e.g. Saclay de 4 puits sur le même périmètre où les résultats du premier forage permettent de mieux adapter la crépine pour les 3 suivants).</p> <p>La question de la mutualisation de crépine a été rapidement évoqué mais ne semble pas répondre aux besoins des participants</p> <p>Les fines qui remontent lors de l'exploitation sont de très petite taille (inf 1µm), le choix des crépines n'influence a priori en rien ce problème.</p> <p><u>Réflexion autour de l'exploitation</u></p> <p>Quelques échanges autour des puits verticaux vs incliné sur la qualité et facilité de mise en œuvre du massif filtrant mais pas de conclusion. La contrainte principale lors de la création des projets se trouve dans l'espace disponible en surface (foncier) et il est parfois nécessaire de recourir à des forages déviés pour permettre l'écartement entre forage (sauf zone non urbaine, e.g. Saclay)</p> <p>Le BRGM va également analyser les données d'essai de production/injection, les flowmétries, les débits d'exploitation et débits critiques ainsi que les vitesses d'entraînement à l'entrée des crépines et diamètres des tubages afin d'estimer des vitesses critiques pour les ouvrages. Cette estimation semble importante pour la mobilisation des fines dans le proche puits.</p> <p>Dalkia et CFG fourniront les analyses particulières afin d'identifier si une corrélation débit/production de fines peut être faite pour une même opération. La récupération des particules au niveau des filtres pourrait être envisagée à l'avenir pour réaliser des mesures ultérieures afin de caractériser la nature des particules, faire des comptages par exemple. Le cadre de ces travaux reste à définir.</p> <p>Sur les opérations moins profondes (géothermie de surface), il y a un rétro-lavage (backwash) systématique qui est mis en place (parfois d'une heure toute les semaines) pour résoudre l'arrivée des fines dans les forages.</p>

1/2

Annexe 2

Tableau de synthèse des informations recueillies par opération à l'Albien et au Néocomien du Bassin de Paris

Opérations	Paris, Tours AGF (Crystal et Mirabeau)	Paris, Tours AGF (Crystal et Mirabeau)	Issy-les-Moulineaux (92)	Issy-les-Moulineaux (92)	Plessis-Robinson (92)	Plessis-Robinson (92)	Paris (75) (ZAC Clichy-Batignolles)	Paris (75) (ZAC Clichy-Batignolles)	Saclay-Moulon (91)	Saclay-Moulon (91)	Saclay-Polytechnique (91)	Saclay-Polytechnique (91)
Réservoir cible	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	NEOCOMIEN	NEOCOMIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN
Sigle	B16 (Cristal)	B20 (Mirabeau)	ILM-1	ILM-2	LPR-1	LPR-2	P1-ST	P2	GMOU1	GMOU2	GEP1	GEP2
X surface (L93)	647287	647085	646091	646375	645023	645091	649314	6866313	638187	639195	641609	641242
Y surface (L93)	6861249	6861005	6857545	6857806	6853040	6853650	6866313	6865965	6845500	6846279	6845940	6846973
X toit réservoir (L93)	647287	646969	646091	646460	645023	645339	649276	649508	638187	639195	641609	641242
Y toit du réservoir (L93)	6861249	6860847	685745	6857891	6853040	6853648	6866427	6865855	6845500	6846279	6845940	6846973
Z surface (m/sol)	30	32,8	89	92,5	174	170	92,5	89	151,75	160,2	158,82	153,04
Date de mise en service	1990	1990	2013	2013	2013	2013	2016	2016	2019	2019	2020	2020
Puissance thermique init (MWth)	4,1		3,8		5,3		3,6		4,7		5,2	
Débit dim. Init. (m3/h)	130	130	200	200	200	200	180	180	200	200	200	200
Température production (°C)	27	27	29,2	28,4	38,7	37,5	27,3	27,3	30,4	30	32,6	30
Température moyenne de réinjection(°C)				13		16		10		10		10
Indice BSS	01836A0571	01836A0572	01836C0341	01836C0342	02192X0471	01836C0340	?	?	?	?	?	?
Maitre d'ouvrage	AGF - DIDT				Eau de Paris				Etablissement Public d'Aménagement Paris - Saclay		Etablissement Public d'Aménagement Paris - Saclay	
Maitre d'œuvre	GEOTHERMA		G2H Conseils /CFG Services		G2H Conseils /CFG Services		Direction de l'Ingénierie et du Patrimoine / TERRE en		GPC I&P		GPC I&P	
Entreprise de forage	COFOR		Forages MASSE		COFOR		COFOR		SMP		SMP	
Exploitant	AFUL		DALKIA		DALKIA		COFOR		IDEX RESEAUX		IDEX RESEAUX	
Appareil de forage			SOILMEC G75		HH 102		HH 102 B		SMP 5		SMP 5	
Dates de réalisation	17/07/89 au 20/09/89	30/09/89 au 30/11/89	19/07/11 au 02/11/11	10/01/12 au 25/04/12	07/12/11 au 15/03/12	05/03/12 au 07/09/12	02/09/14 au 29/11/14	25/07/14 au 20/08/14	11/07/2017 au 31/08/2017	23/10/2017 au 10/12/2017	15/09/2017 au 31/10/2017	25/08/2017 au 29/12/2017
Durée de forage (jours)	66	62	107 (travaux discontinus)	107 (travaux discontinus)	53 (travaux discontinus)	46 (travaux discontinus)	89 (travaux discontinus)	27 (travaux discontinus)	31	31	29	26
Fonction	réversible (puits chaud)	réversible (puits froid)	producteur	injecteur	producteur	injecteur	producteur	injecteur	producteur	injecteur	producteur	injecteur
Inclinaison (toit du réservoir)	vertical	dévié (40°, Az 214,6)	vertical	dévié (27°, Az 51,7)	vertical	dévié à 263m (incl. 30°, Az 0,26°)	dévié (22,3°, Az 344)	dévié (15,9°, Az 157,6)	vertical	vertical	vertical	vertical
Profondeur totale (md)	615	654	646 (-553 mNGF)	701	991	1040	764	755	733	736	755	757
Distance impacts forages au réservoir (m)	512,6		506		685		617		1274		1096	
Tubages	acier 13"3/8 de 0 à 521 m	acier 13"3/8 de 0 à 119,5 m puis 9"5/8 de 74,85 à 560 m	acier 18"5/8 de 0 à 191 m puis acier 13"3/8 de 161,7 à 541 m	acier 18"5/8 de 0 à 124,3 m puis acier 13"3/8 de 0 à 560 m	acier 16" de 0 à 374,5 m puis acier 10"3/4 de 332 à 888 m	acier 16" de 0 à 236,65 m puis acier 10"3/4 de 182 à 906,85 m	acier 16" de 0 à 177,5 m puis acier 10"3/4 de 153 à 666,5 m	acier 16" de 0 à 164 m puis acier 10"3/4 de 140 à 665 m	acier 18"5/8 de 0 à 247,2 m puis acier 13"3/8 de 0 à 651,8 m	acier 18"5/8 de 0 à 214,5 m puis acier 13"3/8 de 0 à 650,5 m	acier 18"5/8 de 0 à 249 m puis acier 13"3/8 de 0 à 665,7 m	acier 18"5/8 de 0 à 258 m puis acier 13"3/8 de 0 à 663 m
Diamètre forage du réservoir	trou 12"1/4 alésé 15"	trou 8"1/2 alésé 15"	trou 12"1/4 alésé 15"	trou 12"1/4	trou 9"1/2 alésé 15"	trou 9"1/2 alésé 11"	trou 9"5/8	trou 9"5/8 alésé en 9"7/8	trou 12"1/4 alésé en 15"			
Complétion	crépine inox double paroi 5" x 8" pré-gravillonnée	crépine inox double paroi 5" x 8" pré-gravillonnée et tube plein face argiles	crépine inox 304 L 8"5/8 type JOHNSON à fil continu enroulé, alternance tubes pleins	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK 8"5/8 x 10"5/8, alternance tubes pleins	crépine inox 304 L 7"5/8 type JOHNSON à fil continu enroulé, alternance tubes pleins	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK 6"5/8 x 8"5/8, alternance tubes pleins	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK 6"5/8 x 8"5/8	crépine inox 304 L JOHNSON MUNI-PAK 6"5/8 x 8"5/8	crépine Superweld inox 316 L 10" renforcée à fil enroulé avec gravel pack	crépine Superweld inox 316 L 10" renforcée à fil enroulé avec gravel pack	crépine Superweld inox 316 L 10" renforcée à fil enroulé avec gravel pack	crépine Superweld inox 316 L 10" renforcée à fil enroulé avec gravel pack
Massif filtrant	Pré-gravillonnée de calibre 1 à 2,5 mm + espace annulaire graviers siliceux de calibre 1 à 2,5 mm	Pré-gravillonnée de calibre 1 à 2,5 mm + espace annulaire graviers siliceux de calibre 1 à 2,5 mm	gravier de calibre 1 à 1,25 mm	gravier de calibre 1,16 à 1,7 mm	gravier de calibre 0,8 à 1,4 mm	billes de verre de calibre 1,25 à 1,65 mm, espace annulaire massif de gravier de calibre 2,5 à 5 mm	billes de verre de calibre 1,25 à 1,65 mm	billes de verre de calibre 1,25 à 1,65 mm	gravier siliceux de calibre 1 à 2,5 mm	gravier siliceux de calibre 1 à 2,5 mm	gravier siliceux de calibre 1 à 2,5 mm	gravier siliceux de calibre 1 à 2,5 mm
Epaisseur massif filtrant (pouce)	3"	3"	6"3/8	2"	7"3/8	2"	2"	2"	5"	5"	5"	5"
Slot (mm)	0,8	0,75	0,8	0,8	0,75	1	1	1	0,7	1 mm (0,7 mm entre 635 et 651 m)	0,7	1 mm (0,7 mm entre 657,1 et 673,3 m)
Hauteur crépine totale (m)	83,71	90,86	54,2	104,1	72,1	86	56,95	57	72	108	72	108
Hauteur crépine disponible (m)	83,71	55,12										
Lithologie	alternance sables / argiles		alternance sables / argiles		alternance sables / argiles		alternance sables / argiles		alternance sables / argiles		alternance sables / argiles	
Granulométrie des sables de Frécambault			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 2,7 %	Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 3,8 %			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 9,1 %	Dmax: 5 mm Passant à 0,08 mm : 43,8 %				
Granulométrie des sables de Drillons			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 1,3 %	Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 4,6 %			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 6,4 %	Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 26,3 %				
Granulométrie des sables Verts			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 6,1 %	Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 10 %			Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 7,5 %	Dmax: 2 mm Passant à 0,08 mm : 9,4 %				
Granulométrie des sables du Néocomien					Dmax: 5 à 10 mm Passant à 0,08 mm : entre 30 et 47 % (analyse sur 5 échantillons)	Dmax: 1 à 5 mm Passant à 0,08 mm : entre 30 et 75 % (analyse sur 5 échantillons)						
D60 échantillon le plus fin			0,4 mm	0,28 mm	0,25 mm	0,27 mm	0,3 mm	0,25 mm	0,47 mm	0,4 mm	0,34 mm	0,45 mm
D10 échantillon le plus fin			<0,08 mm	<0,08 mm	<0,08 mm	<0,08 mm	0,09 mm	<0,08 mm	0,15 mm	0,13 mm	0,12 mm	0,12 mm
U = D60/D10 (passant)							~3	<3	~3	~3	<3	>3
D30 (formation) * 4			0,8 mm	0,8 mm	<0,32 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,36 mm	0,8 à 1,48 mm	0,8 à 1,48 mm	0,6 à 1,6 mm	0,8 à 1,4 mm
D30 (gravier)			~1,6 mm	NC	>1 mm	NC			1,43 mm	1,43 mm	1,52 mm	1,4 mm

Opérations	Paris, Tours AGF (Crystal et Mirabeau)	Paris, Tours AGF (Crystal et Mirabeau)	Issy-les-Moulineaux (92)	Issy-les-Moulineaux (92)	Plessis-Robinson (92)	Plessis-Robinson (92)	Paris (75) (ZAC Clichy-Batignolles)	Paris (75) (ZAC Clichy-Batignolles)	Saclay-Moulon (91)	Saclay-Moulon (91)	Saclay-Polytechnique (91)	Saclay-Polytechnique (91)
Réservoir cible	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	NEOCOMIEN	NEOCOMIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN	ALBIEN
Sigle	B16 (Cristal)	B20 (Mirabeau)	ILM-1	ILM-2	LPR-1	LPR-2	P1-ST	P2	GMOU1	GMOU2	GEP1	GEP2
X surface (L93)	647287	647085	646091	646375	645023	645091	649314	6866313	638187	639195	641609	641242
Y surface (L93)	6861249	6861005	6857545	6857806	6853040	6853650	6866313	6865965	6845500	6846279	6845940	6846973
X toit réservoir (L93)	647287	646969	646091	646460	645023	645339	649276	649508	638187	639195	641609	641242
Y toit du réservoir (L93)	6861249	6860847	685745	6857891	6853040	6853648	6866427	6865855	6845500	6846279	6845940	6846973
Z surface (m/sol)	30	32,8	89	92,5	174	170	92,5	89	151,75	160,2	158,82	153,04
Date de mise en service	1990	1990	2013	2013	2013	2013	2016	2016	2019	2019	2020	2020
Puissance thermique init (MWth)	4,1		3,8		5,3		3,6		4,7		5,2	
Débit dim. Init. (m3/h)	130	130	200	200	200	200	180	180	200	200	200	200
Température production (°C)	27	27	29,2	28,4	38,7	37,5	27,3	27,3	30,4	30	32,6	30
Température moyenne de réinjection(°C)				13		16		10		10		10
Toit du réservoir (md/mNGF)	-492 mNGF	-480 mNGF	543m/-460 mNGF	563m/-540 mNGF	846m/-672mNGF	889m/-655mNGF	668m/-616,5mNGF	665m/-613,7mNGF	655m/-494,8mNGF	656,6m/-504,8mNGF	680m/-521,2mNGF	680,5m/-527,5mNGF
Epaisseur totale foré (md)	67	67	97	109	144	132	82	75	71	65	66	64,5
Epaisseur utile d'après flowmétré (m)	37	50	50,2	95,1	27,2	71,6	37,6	33,9	14	17,5	18	22,1
Débit de flowmétré (m3/h)			73	73	47,5	72	52	60	159	200	160	210
Géochimie (prélèvements fond / surface)												
pH	7,7		7,43	7,78	7,6	7,64	7,9	7,85	7,7		7,6	
conductivité (µS/cm)			278	264	412	448	284	357	263		251	
Salinité totale (g/l)	0,26											
Point de bulle (bars)												
Fluide de forage	boue aux polymères	boue aux polymères	boue aux polymères + batéricides	boue aux polymères + batéricides	boue aux polymères + batéricides	boue aux polymères + batéricides	boue aux polymères + batéricides	boue aux polymères + batéricides	boue polymère améliorée	boue polymère améliorée	boue polymère améliorée	boue polymère améliorée
Nettoyage / traitement	hexaméthaphosphate	hexaméthaphosphate + eau oxygénée	désinfectant (oxonia)	soufflage + pompage	hexaméthaphosphate	hexaméthaphosphate		hexaméthaphosphate	désinfection du puits avec traitement à l'OXONIA	désinfection du puits avec traitement à l'OXONIA	désinfection du puits avec traitement à l'OXONIA	désinfection du puits avec traitement à l'OXONIA
Développement du puits	hexaméthaphosphate et pompage	hexaméthaphosphate et eau oxygénée	soufflage + air-lift (4 jours) + essai par paliers	soufflage + air-lift (10 jours) + essai par paliers	air-lift + pistonage (9 jours) + essai par paliers	air-lift + soufflage (10 jours) + essai par paliers	air-lift (40 hrs) + pompage (16 hrs)	air-lift (30 hrs) + pompage (20 hrs)	air-lift (79 h) + pompage (7 jours)	air-lift (36 h) + pompage (7 jours)	air-lift (34 h15) + pompage (6 jours)	air-lift (36h15) + pompage (7 jours)
Niveau statique (m/sol)	19,5	19,3	53,3	49,3	101	99,65	3,2	9,1	112	100,1	110,95	103,15
Débit max dvlpt. (m3/h)			274	251	240	200	200	200	269	272	200	255
IP après développement (m3/h/m)			11,7	9,4	3,5	3,3	5,4	4,3	21,3	22,78	12,8	
Durée de l'essai long (h, P/I)	72	72	72/	52/	72/	72/	72/24	72/24	72/36	72/32	48/35	64/32
Débit de l'essai (m3/h)	160	160	216	244	185	187	204,5	180	270	200	200	205
Rabattement (m)	24,6	43,2	21,4	38,1	62,5	62,3	40,9	41,9	15,3	10,91	16,3	9,5
Transmissivité en descente (m²/s)	5,30E-03	3,00E-03	5,60E-03	5,94E-03	2,53E-03	3,44E-03			7,4.10-3	7,9.10-3	7,3.10-3	1.10-2
Transmissivité en remontée (m²/s)			6,00E-03	7,58E-03	1,32E-03	1,10E-03	3,25.10-3	2,5.10-3	9,2.10-3	6.10-3	1.10-2	9,5.10-3
Indice de productivité (m³/h/m)	6,5	3,7	10,1	6,4	2,96	3	5	4	17,6	18,3	12,2	21,5
Indice d'injectivité (m³/h/m)				4,2		3,7		3,8		?		?
Pression d'injection max. (bars)	8	2										
Débit critique (m3/h)	80				Non atteint				Non atteint	253	Non atteint	Non atteint
diamètre ext crépines (m)	0,2032	0,2032	0,2191	0,254	0,1937	0,2191	0,228	0,228	0,254	0,254	0,254	0,254
Indice d'ouverture des crépines (%)				8,0%	18,0%	8,4%	23,5%	23,5%	21,9%	21,9%	21,9%	21,9%
Vitesse entrée crépines: phase de dvlpt. pour Hcrépines totale (cm/s)				0,63	0,51	0,67	0,40	0,35	0,36	0,24	0,35	0,23
Vitesse entrée crépines: phase de dvlpt. pour Hflowmétré (cm/s)				0,69	1,34	0,81	0,61	0,58	1,83	1,48	1,39	1,10
Vitesse entrée crépines au débit nominal (init.) pour Hcrépines (cm/s)				0,50	0,42	0,67	0,31	0,31	0,26	0,18	0,26	0,18
Vitesse entrée crépines au débit nominal (init.) pour Hflowmétré (cm/s)				0,55	1,12	0,81	0,47	0,53	1,36	1,09	1,06	0,86
Vitesse critique théorique de déstabilisation derrière crépines (<1cm/s) pour H crépines (m3/h)				399	473,85	298	575	576	755	1132	755	1132
Vitesse critique théorique de déstabilisation derrière crépines (<1cm/s) pour H flowmétré (m3/h)				364	179	248	380	342	147	183	189	232
Vitesse circulation moyenne entrée crépine (cm/s)	1,5	0,6	0,8 (localement > 3)				0,8	0,8				
Système de filtration avant échangeur			1 filtre cyclonique +2 filtres à tamis (130 µm)		3 filtres cycloniques (100 µm)		filtre cyclonique et à tamis de 100 µm		1er étage 100 µm (tamis), 2ème étage 10 µm, 3ème étage jusqu'à 2 µm (filtre à cartouche)		1er étage 100 µm (tamis), 2ème étage 10 µm, 3ème étage jusqu'à 2 µm (filtre à cartouche)	
Système d'injection d'inhibiteurs de corrosion	non		non		non		non					
Système d'injection d'azote en surface	non		non		non		non					



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

Direction des Géorressources - Division Géothermie

3, avenue Claude Guillemin

BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr