

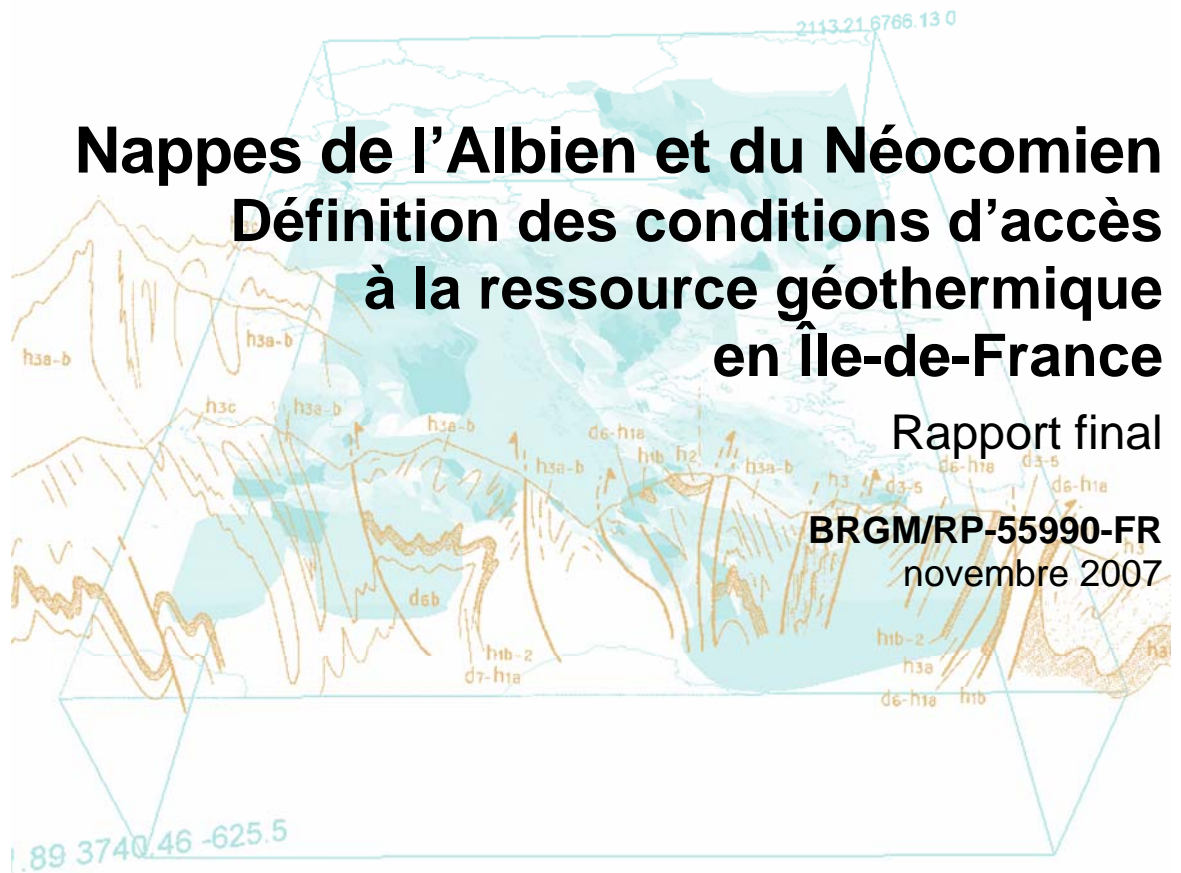


Nappes de l'Albien et du Néocomien Définition des conditions d'accès à la ressource géothermique en Île-de-France

Rapport final

BRGM/RP-55990-FR

novembre 2007



Nappes de l'Albien et du Néocomien Définition des conditions d'accès à la ressource géothermique en Île-de-France

Rapport final

BRGM/RP-55990-FR
novembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 07ENEC05

J.Y. Hervé, I. Ignatiadis

Vérificateur :

Nom : A. DESPLAN

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : M. LE NIR

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Géothermie, Albien, Néocomien, Forages, Recommandations.

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

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

Synthèse

Les nappes de l'Albien et du Néocomien sont présentes dans l'ensemble du bassin parisien à une profondeur moyenne de l'ordre de 600 m pour l'Albien et de 750 m pour le Néocomien.

Ces nappes représentent pour l'ensemble du bassin parisien une réserve en eau importante à l'abri des pollutions superficielles. On y trouve en quantité abondante une eau douce de bonne qualité à une température comprise entre 25 et 30 °C. La productivité des ouvrages est excellente et peut dépasser 200 m³/h par forage.

Dans le passé, une exploitation intensive à des fins industrielles et pour l'alimentation en eau potable a fait baisser le niveau de la nappe de l'Albien. Aujourd'hui, cette nappe et celle du Néocomien sont considérées comme une réserve stratégique d'eau potable par les pouvoirs publics qui en restreignent l'accès.

Ces nappes étant relativement profonde, leur accès n'est pas immédiat ni direct. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de la population en cas d'urgence ne peut être envisagée qu'à partir d'ouvrages préexistants pouvant servir de points de distribution ou que l'on pourrait connecter à la demande au réseau général de distribution. Dans ce but, la DRIRE Île-de-France envisage d'autoriser la création de forages, sous certaines réserves, précautions et obligations, qui sont l'objet de cette étude. Les principaux éléments pris en compte sont les suivants :

- exploitation : il s'agit avant tout de préserver la ressource pour un objectif d'alimentation en eau potable (AEP) sécurisée. Les autres exploitations envisagées ne devront donc pas avoir d'influence sur la ressource, ni qualitativement, ni quantitativement. Un usage thermique de la ressource pourrait donc éventuellement être envisagé, sous réserve de réinjecter l'eau pompée dans la nappe après en avoir extrait les calories, tout en assurant la conservation de la qualité de l'eau réinjectée ;
- risques sanitaires : l'accès à la ressource (forages, équipements constitutifs des forages), les équipements de la boucle géothermique primaire (pompes d'exhaure, canalisations, pompes à chaleur et/ou échangeurs thermiques) et la réinjection des fluides peuvent entraîner des risques de pollutions de la nappe. Il apparaît donc important d'évaluer et d'analyser les risques sanitaires que pourraient présenter ces installations afin d'imposer la mise en œuvre d'une protection adéquate vis-à-vis des risques qui seront déterminés ;
- spécifications des forages : les procédures de réalisation des forages géothermiques ainsi que les matériaux et équipements utilisés devront être adaptés aux objectifs de préservation et de protection de la ressource, tant au niveau des ouvrages de production qu'à celui des forages de réinjection ;
- spécifications des équipements de production : dans le même esprit, il s'agira de définir au mieux les équipements de surface et les procédures d'exploitation les mieux adaptées dans la boucle de surface ;

- procédures de contrôle et de suivi : il s'agira enfin de définir le suivi périodique de l'exploitation, la mise en place de contrôles adaptés et les procédures d'entretien des puits, afin d'assurer la sécurité des nappes.

L'exploitation de la ressource géothermique de nappes de l'Albien et du Néocomien apparaît envisageable moyennant certaines contraintes ou exigences à appliquer sur les opérations géothermiques concernées.

La contrainte principale exprimée par les autorités est l'obligation de réinjecter les eaux pompées dans la nappe où elle est prélevée. Cette obligation impose pour les futurs projets :

- d'avoir la possibilité matérielle (espace) de réaliser le forage de production et le forage d'injection tout en respectant un écartement suffisant entre les puits ;
- de s'assurer de la capacité de ces formations captées à réabsorber les débits pompés pendant la durée de vie du projet ;
- de mettre en œuvre les moyens d'assurer la conservation de la qualité des eaux.

Il apparaît délicat et coûteux, compte tenu de la relativement faible profondeur des nappes, de réaliser à partir d'une même plate-forme des forages suffisamment inclinés pour respecter l'écartement nécessaire au toit du réservoir (entre 500 et 700 m selon les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe). D'autre part, la réalisation de forages verticaux pourrait être préférée à celle de forages déviés, en particulier pour des raisons de qualité de construction et de facilité de maintenance. Pour réaliser un projet, il faudra donc pouvoir disposer de deux emplacements de plate-forme aux distances requises.

Les capacités de réinjection de la nappe de l'Albien (et plus encore de celle du Néocomien) sont très mal connues, qu'elles soient immédiates ou à long terme. La faisabilité et la pérennité des opérations vont en dépendre. Il apparaît donc important de prendre les moyens d'acquérir rapidement des connaissances suffisantes pour s'assurer de la faisabilité de la réinjection dans ces formations.

Garantir la conservation de la qualité des eaux implique un certain nombre de précautions à prendre lors de la réalisation des ouvrages et pendant leur exploitation. On s'assurera en particulier :

- de la mise en place d'un suivi général de l'évolution thermique et qualitative des nappes ;
- de la qualité de réalisation des forages et tout particulièrement ce qui concerne leur étanchéité : tubages, cimentation ;
- de la protection bactériologique de l'aquifère pendant la foration ;
- de la désinfection de l'ensemble la boucle avant sa mise en exploitation ;
- de la mise en place de moyens et procédures de protection contre les risques de pollutions externes identifiées sur le projet ;
- du suivi et du contrôle périodique de la boucle géothermale pendant son exploitation (paramètres physiques, chimiques et bactériologiques).

Sommaire

1. Introduction	7
2. Analyse des risques sanitaires	9
2.1. IMPACTS THERMIQUES AU RÉSERVOIR.....	9
2.2. RISQUES CHIMIQUES	12
2.2.1. Généralités sur les eaux de l'Albien.....	12
2.2.2. Problèmes spécifiques de l'exploitation par forage.....	14
2.2.3. Définition des conditions d'exploitation typiques de l'Albien	15
2.2.4. Modélisations spécifiques de l'exploitation par forage.....	16
2.3. RISQUES MICROBIOLOGIQUES.....	17
2.4. RISQUES DE POLLUTIONS EXTERNES.....	18
3. Spécifications de la boucle géothermique	21
3.1. CONTRAINTES DE LA RÉINJECTION.....	21
3.2. CONTRAINTES DE SURFACE	23
3.3. CONCEPTION DES PUIITS DE PRODUCTION.....	26
3.3.1. Programme sommaire du forage de production vertical.....	27
3.3.2. Programme sommaire du forage de production dévié :.....	28
3.4. CONCEPTION DES PUIITS DE RÉINJECTION	28
3.4.1. Programme sommaire du forage d'injection vertical.....	29
3.4.2. Programme sommaire du forage d'injection dévié.....	29
3.5. CHOIX DES MATÉRIAUX	30
3.5.1. Discussion sur les choix des tubages	30
3.5.2. Choix des crépines	32
3.5.3. Cimentations	32
3.5.4. Fluides de forage	35
3.6. PROCÉDURES ET PRÉCAUTIONS DE RÉALISATION DES FORAGES	36
3.6.1. Plateforme de forage.	36
3.6.2. Fluides de forage	37
3.6.3. Cimentations	38

3.6.4. Recommandations diverses	39
3.7. MISE EN PRODUCTION DES OUVRAGES.....	39
4. Équipements de production	41
4.1. TÊTES DE PUIITS	41
4.2. POMPES ET COLONNES D'EXHAURE	41
4.3. CIRCUIT PRIMAIRE	43
4.4. POMPES À CHALEUR ET ÉCHANGEURS	43
4.5. POMPES ET COLONNES DE RÉINJECTION	44
5. Conditions d'exploitation et procédures de contrôles	45
5.1. MODES D'EXPLOITATION.....	45
5.2. CONTRAINTES ET PRÉCAUTIONS DE FONCTIONNEMENT	46
5.3. MOYENS ET PROCÉDURES DE CONTRÔLES.....	47
5.3.1. Contrôle de fonctionnement	47
5.3.2. Contrôle chimique et microbiologique (type, fréquence, ...).	48
5.4. MAINTENANCE DES PUIITS	50
6. Conclusions	51
7. Bibliographie	55

1. Introduction

La nappe constituée par les sables de l'Albien est présente dans l'ensemble du Bassin parisien à une profondeur moyenne de l'ordre de 600 m. Elle peut atteindre jusqu'à 950 m au centre du bassin. Elle surplombe la nappe du Néocomien qui est située environ 150 m plus profond.

La nappe de l'Albien représente pour l'ensemble du bassin parisien une ressource en eau importante à l'abri des pollutions superficielles. On y trouve en quantité abondante une eau douce de bonne qualité à une température comprise entre 25 et 30 °C. La productivité des ouvrages est excellente et peut dépasser 200 m³/h par forage.

La nappe du Néocomien est moins connue, mais représente comme l'Albien une ressource importante avec une eau de qualité similaire. À Bruyères-le-Châtel, elle est exploitée par une opération de géothermie à un débit de 150 m³/h et une température de 34 °C.

Dans le passé, une exploitation intensive à des fins industrielles et pour l'alimentation en eau potable a fait baisser le niveau de la nappe de l'Albien (baisse de l'ordre de 70 m). Aujourd'hui, cette nappe et celle du Néocomien sont considérées comme une réserve stratégique d'eau potable par les pouvoirs publics qui en restreignent l'accès.

Actuellement, en région parisienne, deux opérations géothermiques à l'Albien (Maison de la Radio et AGF) et une opération géothermique au Néocomien (CEA/DAM à Bruyères-le-Châtel) exploitent ces nappes pour le chauffage et la climatisation. Ces prélèvements s'effectuent sans réinjection et représentent une production thermique de 64 000 MWh.

Les nappes de l'Albien et du Néocomien étant relativement profonde (de l'ordre de 1 000 m au centre du Bassin parisien), leur accès n'est pas immédiat ni direct. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de la population en cas d'urgence ne peut être envisagée qu'à partir d'ouvrages préexistants pouvant servir de points de distribution ou que l'on pourrait connecter à la demande au réseau général de distribution.

Dans ce but, la DRIRE Île-de-France envisage d'autoriser la création de forages à l'Albien et au Néocomien, sous certaines réserves, précautions et obligations, qui sont l'objet de cette étude. Les principaux éléments pris en compte sont les suivants :

- exploitation : il s'agit avant tout de préserver la ressource pour un objectif d'alimentation en eau potable (AEP) sécurisée. Les autres exploitations envisagées ne devront donc pas avoir d'influence sur la ressource, ni qualitativement, ni quantitativement. Un usage thermique de la ressource pourrait donc éventuellement être envisagé, sous réserve de réinjecter l'eau pompée dans la nappe après en avoir extrait les calories, tout en assurant la conservation de la qualité de l'eau réinjectée ;

- risques sanitaires : l'accès à la ressource (forages, équipements constitutifs des forages), les équipements de la boucle géothermique primaire (pompes d'exhaure, canalisations, pompes à chaleur et/ou échangeurs thermiques) et la réinjection des fluides peuvent entraîner des risques de pollutions de la nappe. Il apparaît donc important d'évaluer et d'analyser les risques sanitaires que pourraient présenter ces installations afin d'imposer la mise en œuvre d'une protection adéquate vis-à-vis des risques qui seront déterminés. Les équipements de surface de la boucle secondaire, séparés du fluide géothermal par l'échangeur thermique primaire ou la pompe à chaleur, ne sont impliqués dans cette étude que par les éventuels risques que pourraient induire des échanges de fluides entre les deux réseaux théoriquement séparés ;
- spécifications des forages : les procédures de réalisation des forages géothermiques ainsi que les matériaux et équipements utilisés devront être adaptés aux objectifs de préservation et de protection de la ressource, tant au niveau des ouvrages de production qu'à celui des forages de réinjection ;
- spécifications des équipements de production : dans le même esprit, il s'agira de définir au mieux les équipements de surface et les procédures d'exploitation les mieux adaptées dans la boucle de surface. Ces équipements comprennent en particulier les têtes de puits, les pompes d'exhaure, les canalisations de surface (circuit primaire ou boucle géothermale, y compris les échangeurs thermiques), les pompes à chaleur, ainsi que les pompes et le matériel de réinjection ;
- procédures de contrôle et de suivi : il s'agira enfin de définir le suivi périodique de l'exploitation, la mise en place de contrôles adaptés et les procédures d'entretien des puits, afin d'assurer la sécurité des nappes.

Seules les contraintes techniques seront abordées dans l'étude. Il ne sera pas fait mention des contraintes législatives, administratives, économiques et juridiques qu'une exploitation mixte AEP-géothermie sur un même site pourrait entraîner.

2. Analyse des risques sanitaires

L'exploitation par doublet (un puits de production, un puits de réinjection) de la ressource géothermique des nappes de l'Albien et du Néocomien au moyen d'une pompe à chaleur (PAC) entraîne une modification des températures de rejet de l'eau avec des conséquences diverses :

- des conséquences sur les niveaux de température locale et globale du réservoir ;
- des conséquences chimiques liées aux variations de contraintes physiques (température, pression) subies par l'eau réinjectée ;
- des conséquences biologiques résultant des modifications physico-chimiques du milieu sur le développement des bactéries ;
- des risques de pollutions externes avec pour conséquences des impacts chimiques ou biologiques sur le réservoir.

2.1. IMPACTS THERMIQUES AU RÉSERVOIR

Sur l'ensemble du bassin, la température de la nappe de l'Albien varie selon les emplacements et la profondeur entre 18 °C et 36 °C, avec une moyenne située aux alentours de 24 °C. L'exploitation du réservoir à des fins géothermiques va provoquer des modifications de la température des eaux de rejet entraînant soit une baisse de température dans le cas de l'utilisation de la ressource pour le chauffage, soit une augmentation de la température dans le cas de son utilisation pour la climatisation.

L'impact thermique va pouvoir se mesurer à trois niveaux :

- tout d'abord au niveau du puits de réinjection et de son environnement immédiat. Dans le cas d'une utilisation pour le chauffage, l'extraction des calories par la pompe à chaleur provoque un abaissement de la température de l'eau rejetée. L'abaissement maximum sera évalué afin de permettre un bon fonctionnement du cycle thermodynamique et éviter des modifications chimiques au niveau du réservoir.

Si on souhaite, pour éviter les inconvénients du gel, un liquide frigorigène avec une température à l'évaporation toujours supérieure à 2 °C, le liquide caloporteur intermédiaire se situera aux alentours de 5 °C et la température de l'eau géothermale après échange à environ 8 °C .

On peut donc considérer que la température moyenne du rejet se situera à son minimum autour de 10 °C, avec une limite à ne pas dépasser de 8 °C ;

- au niveau du volume exploité par le doublet, il s'agit de contrôler l'évolution de l'extension de la zone froide au cours de l'exploitation. Cette évolution dépend à la fois des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir, du sens d'écoulement de la nappe, des capacités calorifiques du milieu et des conditions de l'exploitation (débit, température de rejet). L'écartement entre le puits de production et le puits de

réinjection est calculé de façon à assurer une baisse de température négligeable (inférieure à 1°C) au bout de 25 à 30 ans de fonctionnement.

Dans le cas de l'Albien, la modélisation montre que cet écartement va varier entre 500 m et 700 m en fonction des paramètres locaux de la nappe et de l'exploitation qui en est faite ;

- au niveau de l'évolution thermique générale de la nappe : l'exploitation de la nappe de l'Albien à grande échelle peut entraîner à long terme un abaissement de sa température moyenne. Cette évolution et les interactions entre les doublets devront faire l'objet de modélisations globales de la nappe prenant en compte l'ensemble des exploitations et d'un suivi périodique éventuel en certains points choisis comme représentatifs de ces évolutions.

D'une façon générale, on observe que :

- l'abaissement de la température moyenne de la nappe va dépendre essentiellement du nombre d'opérations envisagées et de leur implantation. On peut considérer que cet abaissement restera néanmoins faible pendant la durée de l'exploitation compte tenu des volumes mobilisés et des écartements prévus entre les forages ;
- ponctuellement, l'abaissement de température peut être important mais reste limité aux volumes proches des forages de réinjection ;
- un impact chimique ne devrait être sensible que si des développements microbiologiques naturels ou provoqués survenaient dans l'environnement des forages ;
- ce développement biologique est généralement plus ralenti que favorisé par la baisse de la température.

On peut donc considérer que, sauf à faire face à un développement bactériologique particulier, l'abaissement de la température de la nappe, ponctuellement ou de façon globale, ne doit pas entraîner d'impact négatif sur la qualité de l'eau.

Dans le cas d'un usage pour la climatisation, le transfert des calories va provoquer une augmentation de la température de l'eau rejetée. Comme dans le cas du refroidissement, les impacts sur la qualité de l'eau ne seront sensibles que si un développement biologique intervient. On notera par contre qu'une augmentation de la température peut en principe favoriser le développement des micro-organismes. On verra plus loin si un tel développement pourrait être nuisible à la qualité de l'eau.

Le cas d'un usage mixte (chauffage hivernal – climatisation estivale) rejoint le cas le plus négatif et peut donc être traité de la même manière que pour un usage exclusivement en climatisation même si l'impact thermique final sur le doublet et sur l'ensemble de la nappe est différent.

Les conclusions et recommandations seront donc :

- d'établir une modélisation thermique globale de la nappe qui sera progressivement ajustée aux exploitations qui seront mis en place ;

- de modéliser de façon précise les interactions entre les forages du doublet et entre doublets en fonction des caractéristiques locales du réservoir et des conditions d'exploitation ;
- de procéder à la mise en place d'un suivi périodique de points représentatifs des évolutions thermiques attendues ;
- de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter le développement naturel ou provoqué de micro-organismes, **en particulier lorsqu'il est prévu une augmentation de la température de l'eau réinjectée**. Si un tel impact se montrait difficile à contrôler, il pourrait être envisagé de limiter ou éventuellement d'interdire un usage géothermique de la nappe à des fins de production de froid.

Récapitulatif des caractéristiques de la nappe de l'Albien :

Profondeur	450 - 750 m
Épaisseur moyenne	100 m
Épaisseur utile	30 - 50 m
Porosité	30 %
Granulométrie	0,1 - 0,4 mm
Perméabilité	100 Dm - 500 Dm Variable
Coefficient d'emménagement	Entre 5.10^{-4} et 10^{-3} Moyenne 5.10^{-3}
Niveau statique	Artésien sub-jaillissant (0 - 30 m)
Débit moyen attendu	200 m ³ /h
Température moyenne	24 °C (18-36 °C)

Caractéristiques de l'exploitation :

Débit exploitable	50 - 250 m ³ /h
Rabattement à 200 m ³ /h	60 - 100 m
Température	24 °C - 30 °C
Ecartement entre puits	500 - 700 m
Température minimale de réinjection	10 °C - 8 °C

En ce qui concerne le Néocomien, on peut noter les éléments suivants :

- profondeur à forer : supérieure de 150 à 200 m à celle de l'Albien ;
- température : gain d'environ 5 °C ;

- productivité : la productivité du Néocomien est considérée comme généralement très inférieure à celle de l'Albien. Mais le Néocomien est mal connu et n'a été testé qu'à de rares occasions ;
- captage : le captage de l'Albien est plus facile que celui du Néocomien du fait d'une granulométrie plus grossière des sables. Capturer le Néocomien, dont les sables sont très fins, nécessite l'installation de compléments de réservoir plus élaborées, plus onéreuses que dans le cas de l'Albien et de mise en place délicate ;
- injection : la capacité de réinjection du Néocomien n'est pas connue. Mais, il est probable - compte-tenu des différences de granulométrie - qu'elle soit nettement inférieure à celle de l'Albien.

2.2. RISQUES CHIMIQUES

2.2.1. Généralités sur les eaux de l'Albien

De par son origine, l'eau de la nappe de l'Albien est une eau douce (dureté 5 à 10 °F), peu calcaire, faiblement minéralisée : la salinité de l'Albien est inférieure à 1,5 g/l sur pratiquement tout le Bassin parisien et inférieure à 0,5 g/l en région parisienne. Toutefois, elle est riche en fer (naturellement ferrugineuse), manganèse et potassium. Par ailleurs, l'eau de l'Albien peut présenter localement des teneurs en fluor élevées. Dans les eaux de l'Albien, la concentration moyenne, voire maximale, en espèces dosées ne dépasse que très rarement celle tolérée dans l'eau potable (cas du fer, du manganèse, du potassium et du fluor). L'eau de l'Albien est rendue potable après traitement par oxydation à l'air et filtration pour éliminer le fer ferreux dissous, mais restent par endroits certaines caractéristiques (manganèse, fluorure et potassium) qui sont légèrement au dessus de norme de potabilité.

D'une manière générale la salinité du Néocomien est plus forte que celle de l'Albien; elle reste néanmoins inférieure à 1 g/l en région parisienne.

À partir des **données chimiques** et isotopiques relativement bien fournies (Raoult, 1999), mais incomplètes, pour une **cinquantaine** de forages en Île-de-France, il a été notamment constaté **que les eaux de l'Albien** :

- sont anaérobies (absence totale d'oxygène) ;
- contiennent du fer ferreux (Fe^{2+}) à leur émergence, ce qui consolide la notion d'anaérobiose ;
- sont très faiblement minéralisées (de 0,3 à 0,6 g/L de salinité totale) ;
- ne contiennent pas de matière organique ;
- présentent un produit d'activité ionique (PAI) montrant une limitation par des minéraux et que leur équilibre vis-à-vis d'un même minéral est variable suivant la situation géographique des prélèvements ;
- dans l'est sont globalement sursaturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite, permettant ainsi des phénomènes de réprécipitation de carbonates de calcium. Ces

eaux de l'est peuvent être en contact avec des roches carbonatées, ce n'est donc pas surprenant que ces eaux soient sursaturées vis-à-vis de ces minéraux ;

- dans le sud, l'ouest et le nord-ouest, sont sous-saturées vis-à-vis de la calcite, mais aussi, pour le Sud, vis-à-vis de la dolomite. Ces eaux circulent dans des sables, l'acquisition de l'alcalinité semble s'effectuer essentiellement par l'altération de silicates et non par dissolution de carbonates de calcium. On peut donc faire comme hypothèse que la ligne d'écoulement Sud se fait sans apport d'une eau sus ou sous-jacente dans l'aquifère sableux Albien, car ces eaux auraient été en contact avec des carbonates de calcium. Cette hypothèse en accord avec les résultats des isotopes du carbone a été vérifiée par Raoult (1999). La silice ne semble pas avoir un comportement conservatif, elle peut en effet reprécipiter avec la kaolinite notamment pour les eaux du Sud fortement sursaturées vis-à-vis de ce minéral ;
- contiennent des éléments dissous tels que les Cl^- , le F^- et le Na^+ qui ont un comportement conservatif dans l'aquifère captif de l'Albien. Ces éléments analysés nous apportent des **informations hydrodynamiques** ;
- contiennent des éléments dissous tels que le Ca^{2+} et Mg^{2+} qui ont un comportement non conservatif. On n'a donc aucune raison d'observer des concentrations semblables sur l'ensemble du Bassin. Globalement, on observe des concentrations plus fortes en Ca^{2+} et Mg^{2+} dans l'Est, le SW et le NW. Ceci s'explique assez facilement du fait des mélanges des eaux de l'Albien dans ces régions avec des eaux qui ont eu un contact avec des aquifères calcaires sous-jacents. Pour les eaux dans le centre-est, les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} sont tout à fait similaires dans cette zone aux concentrations observées sur la ligne d'écoulement sud mais plus faibles que les concentrations observées proches des affleurements de l'est. Les eaux albiennes de l'est sont largement sursaturées par rapport à la calcite et à la dolomite. On peut donc penser que des phénomènes de formations de carbonates contrôlent en partie ces éléments dissous ;
- présentent des alcalinités, qui n'ont pas un comportement conservatif, ce qui confirme le faciès bicarbonaté calcique des eaux de l'est, du sud-ouest et du nord-ouest. En revanche, les lignes d'écoulements captives du sud et de l'ouest vers Paris présentent des alcalinités inférieures à 3 meq/l, voire à 2 meq/l. Ces alcalinités mesurées en partie captive restent faibles le long de la ligne d'écoulement du sud vers Paris ;
- présentent des relations simples entre l'alcalinité et le pH. Ainsi on trouve une augmentation du pH et de l'alcalinité le long de cette ligne d'écoulement des affleurements vers Paris. L'augmentation de l'alcalinité est due à l'altération de silicates (l'albite ou l'anorthite par exemple) comme le montre la bonne concordance des mesures avec les courbes théoriques en milieu fermé, silicaté, avec une PCO_2 initiale fixée. D'après Kloppmann (1995), la pression partielle de CO_2 en système fermé est comprise entre $10^{-1.5}$ et 10^{-1} atm. Les eaux en contact avec une roche carbonatée comme les eaux de la Craie présentent des alcalinités nettement supérieures ;
- prélevées sans filtration (avec sables) au niveau des affleurements du Sud pour réaliser une analyse qualitative aux rayons X des minéraux présents (Dère, 1999) montrent que les minéraux, du type des silicates susceptibles d'être responsables

de la minéralisation de l'eau de l'Albien, sont en très faible quantité. Les sables albiens sont essentiellement constitués de quartz et dans une moindre mesure de kaolinite et d'illite.

- présentent une ligne d'écoulement Sud qui ne se recharge pas par la nappe de la Craie par drainance descendante, mais bien par les affleurements des sables albiens. De plus on peut remarquer que globalement, le gradient de charge n'est pas favorable à une drainance de la Craie vers l'Albien captif. Les calcaires néocomiens proches des affleurements ne peuvent pas non plus être une source de recharge des sables albiens, pour les mêmes raisons. Cette absence d'apport des aquifères sus et sous-jacents sur cette ligne d'écoulement est en conformité avec les conclusions émises à partir des mesures chimiques et isotopiques (Raoult, 1999). On remarquera néanmoins que certaines eaux de la nappe libre du sud semblent pouvoir être influencées par des eaux carbonatées alcalinité et concentration en calcium notamment, un peu plus fortes. Ce type d'eau ne semble pas participer à la recharge de la partie captive. On peut donc émettre l'hypothèse que l'ensemble de la nappe libre ne participe pas à la recharge de la partie captive. La morphologie vallonnée des affleurements albiens dans le sud favorise en effet, le drainage local des eaux de surface par de multiples ruisseaux. Comme nous l'avons vu précédemment, localement au nord d'Auxerre par exemple, les affleurements albiens représentent un exutoire de l'Albien captif plutôt qu'un impluvium (Blavoux et Panetier, 1977). *Les paramètres chimiques étudiés permettent de mettre en évidence l'importance de la ligne d'écoulement sud, qui est la zone de recharge et de circulation préférentielle de la nappe de l'Albien. Cet écoulement dans les sables de l'Albien s'effectue sans apport d'aquifères voisins jusqu'à la région parisienne ; contrairement à la vallée de la Seine, qui présente un hydrodynamisme plus compliqué avec une recharge possible, notamment à partir des aquifères sus et sous-jacents. La région de l'est qui présente une circulation très lente, doit être interprétée à partir de la piézométrie d'avant 1930, qui montre que son exutoire principal est la vallée de la Somme. D'une manière générale, il est donc nécessaire de raisonner sur tout le Bassin avec le régime permanent naturel de la nappe, que nous estimons à partir des quelques points observés avant 1930.*

2.2.2. Problèmes spécifiques de l'exploitation par forage

Les forages exploitant l'eau des aquifères, qu'ils soient profonds ou superficiels, connaissent souvent des problèmes spécifiques de corrosion, de dépôt et de développement d'une activité bactérienne spécifique, laquelle en plus de l'aspect sanitaire néfaste, confère soit plus de corrosion, soit plus de dépôt sur les parois, soit les deux à la fois.

La spécificité des problèmes qui peuvent se manifester est essentiellement liée :

- à la nature de l'eau exploitée ;
- à la nature des tubages du forage et
- aux conditions d'exploitation.

Nous citons ci-après quelques phénoménologies des problèmes de dégradation. En cours d'exploitation, l'équilibre du fluide peut-être perturbé par trois principaux facteurs :

Facteur chimique :

- corrosion des tubages (contenant majoritairement du fer) avec passage de Fe^{2+} et Mn^{2+} en solution, puis dépôt par rééquilibrage du fluide ;
- entrée d'eau superficielle dans les tubages avec mélange des eaux et rééquilibrage du nouveau fluide et dépôt minéral sur les parois des canalisations ou échangeurs.

Facteur physique :

- baisse de pression du fluide et dégazage (ex. départ de CO_2) avec modification du pH (augmentation) puis dépôt de $CaCO_3$.

Facteur biologique :

- prolifération de bactéries aérobies avec dépôts volumineux et mucilagineux et accentuation de phénomènes corrosifs ;
- prolifération de bactéries anaérobies avec consommation de SO_4^{2-} et H^+ et production d' H_2S avec dépôt de sulfures métalliques et corrosion supplémentaire sous dépôt.

La conjonction de ces facteurs peut engendrer de percements des tubages par corrosion ou de pertes de charge dans les puits producteurs ou injecteurs par dépôt (diminution du diamètre des tubages).

2.2.3. Définition des conditions d'exploitation typiques de l'Albien

Lors d'une opération complète de géothermie telle qu'on l'imagine, on peut distinguer quatre états différents que l'eau de l'Albien doit franchir progressivement. Ces étapes sont présentées ci-dessous.

Étape 1 : une décompression quasi-isotherme de 60 – 90 bars au fond du réservoir (sabot du puits producteur) à environ 10 bars en surface avant les échangeurs

L'eau chemine à travers les tubages, aidée par son niveau piézométrique et par une pompe immergée (à environ 100 à 150 m de profondeur), jusqu'à l'amont de l'échangeur de chaleur. On considère qu'elle garde sa température de réservoir, mais qu'elle passe de 60 - 90 bars à environ 10 bars, soit une différence de pression d'environ 50 à 80 bars.

Étape 2 : un refroidissement isobare (environ 10 bars) de 25 °C à 15 °C dans les échangeurs de chaleur

L'eau chemine à travers l'échangeur, aidée par la pompe immergée jusqu'à la sortie de l'échangeur de chaleur. On considère qu'elle gardera sa pression (la perte de charge peut atteindre parfois 4 bars), mais qu'elle perdra environ 10 °C.

Étape 3 : une compression isotherme (à 15 °C) de 10 bars à environ 65 - 95 bars de la sortie des échangeurs jusqu'au pied du sabot du puits injecteur dans le réservoir de l'Albien

L'eau une fois sortie de l'échangeur chemine à travers le puits injecteur pour atteindre le réservoir de l'Albien, aidée par la pompe immergée (côté producteur) ou une pompe d'injection après les échangeurs. On considère que l'eau gardera sa température de sortie de l'échangeur (15 °C), qu'elle passe de 10 bars à environ 65 - 95 bars, soit une différence de pression d'environ 55 à 85 bars.

Étape 4 : un réchauffement isobare (65 - 95 bars) de l'eau dans le réservoir de l'Albien de 15 °C à environ 25 °C

L'eau dans le réservoir se réchauffe de 15 °C à 25 °C.

2.2.4. Modélisations spécifiques de l'exploitation par forage

NB : Les eaux en provenance de l'Albien drainent parfois du sable. Cela peut générer de problèmes d'érosion des parois des tubages ou des échangeurs.

Pour évaluer les risques liés à ces quatre étapes définissant quatre états différents, il a fallu faire des calculs thermodynamiques à l'aide de codes de calcul pour appréhender l'état d'équilibre de l'eau dans ces quatre états.

Les compositions de quatre eaux de l'Albien, Square Lamartine (Lamartine, Paris XVI^e), Place Paul Verlaine (Paul Verlaine, Paris XIII^e) Square de la Madone (La Madone, Paris XVIII^e) et ORTF (Paris XVI^e), dont les caractéristiques ont été commentées dans les paragraphes précédents et sont données en annexe, ont été utilisées pour effectuer de modélisations à l'aide du code de calcul géochimiques PHREEQC 2.13.2. Ces eaux présentent naturellement un équilibre vis-à-vis de carbonates de calcium et les silicates. Les modélisations permettent de constater qu'en absence de prolifération bactérienne et d'aération, il n'y a pas de risques chimiques majeurs (de précipitation d'espèces sur les parois des tubages, de l'échangeur, des tubages de l'injecteur et dans le réservoir côté injecteur) lors de son exploitation typique, définie comme suit :

1. une décompression isotherme depuis le proche réservoir jusqu'à l'entrée des échangeurs de chaleur ;
2. un refroidissement quasi-isobare depuis l'entrée des échangeurs jusqu'à la sortie des échangeurs ;
3. une compression isotherme depuis la sortie des échangeurs jusqu'au sabot du puits d'injection ;
4. un réchauffement isobare depuis le sabot du puits d'injection dans le réservoir profond.

Rappelons que les constantes thermodynamiques (produits de solubilité notamment) sont plus sensibles à une variation de température que de pression. Par exemple, pour

les espèces les plus sensibles (calcite, pyrrhotite, pyrite, ...) la décompression isotherme de 90 bars à 10 bars et la compression isotherme de 10 bars à 90 bars, n'a qu'un effet de l'ordre de 2 % sur la valeur logarithmique de la constante (LogK(P,T)) des espèces. Cependant, le produit d'activité ionique n'atteint jamais le niveau du produit de solubilité, et ainsi les espèces sont toujours dissoutes.

La variation de température en refroidissement isobare (entre 25 °C et 15 °C) et en réchauffement isobare dans le réservoir, bien que plus sensible que la pression, ne produira pas non plus de précipités ou de changements brutaux pouvant provoquer des désordres sur les parois des tubages, de l'échangeur, des tubages de l'injecteur et dans le réservoir côté injecteur.

2.3. RISQUES MICROBIOLOGIQUES

L'eau de l'aquifère de l'Albien est une eau douce d'une nappe captive isolée des échanges avec la surface, et de ce fait, anaérobie. La teneur en oxygène de l'eau est nulle et l'eau est ferrugineuse, c'est-à-dire, qu'elle contient du fer soluble à l'état d'ion ferreux (Fe^{2+}). La présence de ce fer ferreux révèle les conditions réductrices qui règnent dans le réservoir de l'Albien, puisque la spéciation du fer et sa solubilité sont conditionnées par la valeur du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) du milieu. Le fer dissous, Fe^{2+} , de l'Albien, s'il venait à être oxydé, précipiterait rapidement, parce qu'il s'oxyderait en Fe^{3+} (ion ferrique) et précipiterait sous forme d'hydroxyde de forme Fe(OH)_3 , en particulier à la sortie des conduites.

Notons qu'actuellement un traitement par aération de l'eau est nécessaire pour que l'eau de l'Albien devienne potable. Cette aération est suivie d'une filtration pour retenir le Fe(OH)_3 .

La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations. La contamination ou la présence de bactéries thio-sulfato-réductrices et sulfato-réductrices pourraient s'avérer très néfaste aux ouvrages et par la suite au réservoir et à la ressource.

Pour répondre à la question du risque microbiologique, il est nécessaire de posséder de données microbiologiques sur l'eau brute du réservoir de l'Albien. Si la présence des bactéries s'avère positive ou possible par contamination, alors le développement bactérien sera très néfaste pour l'ensemble de l'exploitation et aura raison **à long terme** des propriétés organoleptiques de l'eau.

Or, les seules données microbiologiques de l'Albien en Île-de-France à notre possession proviennent de la DDASS de Paris, sur trois puits actuellement exploités pour la distribution d'eau potable dans la ville de Paris. Il s'agit des eaux des puits du Square Lamartine (Lamartine, Paris XVI^e), de la place Paul Verlaine (Paul Verlaine, Paris XIII^e) et du square de la Madone (La Madone, Paris XVIII^e).

La quasi-totalité des données concerne des cultures poussant sur les eaux de distribution, c'est-à-dire, collectées après le traitement de déferrisation et de filtration.

Ainsi, la culture de bactéries aérobies revivifiables à 22 °C pendant 68 h et à 36 °C pendant 44 h sur des prélèvements d'eau de distribution (après traitement) provenant de trois puits de l'Albien permet de mettre en évidence un très faible taux de bactéries (de 0 à 150 bactéries par mL). Nous ne possédons de données sur des cultures poussant sur l'eau brute de l'Albien.

Aussi, la culture de bactéries coliformes, bactéries et spores sulfito-réductrices, entérocoques et *escherichia coli* sur des prélèvements d'eau de distribution (après traitement) provenant de trois puits de l'Albien permet de constater l'absence totale de ces bactéries.

Nous possédons quelques données sur des cultures poussant sur l'eau brute de l'Albien. Il s'agit des entérocoques au square Lamartine (0 bactéries/mL le 12/06/2006) et d'*Escherichia coli* au square Lamartine et à Paul Verlaine (0 bactéries/mL le 12/06/2006 et 7/6/2006 respectivement).

Ces données sont insuffisantes pour conclure sur le risque microbiologique encouru par les ouvrages et par les propriétés organoleptiques de l'eau, du fait de l'exploitation.

Toutefois, quelques hypothèses peuvent être formulées au regard de ces résultats.

Le potentiel de développement microbiologique anaérobie, dans le proche réservoir de l'Albien côté production, sur les tubages, sur les échangeurs, dans le puits injecteur et dans le réservoir côté injection d'une microflore indigène ou non, est relativement faible. L'eau est douce, pauvre en sulfates (une dizaine de mg/L !) et sans apport en nutriments pour les bactéries (pas de matière organique, faible présence de CO₂).

2.4. RISQUES DE POLLUTIONS EXTERNES

Il existe des risques potentiels de pollutions des nappes captées directement liés à l'environnement des sites où se trouvent implantés les forages. Une pollution peut en effet survenir lorsqu'un élément polluant d'origine externe arrive à pénétrer à l'intérieur de la boucle géothermale et, à partir de là, se diffuser dans les captages jusqu'aux réservoirs.

Une boucle géothermale étant par construction sous pression, une pollution d'origine externe ne peut y pénétrer que par deux moyens : à l'occasion d'une ouverture volontaire ou accidentelle de la boucle primaire et par percolation plus ou moins rapide de fluides externes dans l'axe du forage, soit par les annulaires des tubages, soit au long du contact forage-terrains.

On peut définir trois origines possibles pour des pollutions de ce type :

- une pollution provoquée par une intervention humaine mal contrôlée sur la boucle géothermale primaire ;
- une pollution externe au site, consécutive à un risque naturel majeur, comme par exemple le risque d'inondation ;

- une pollution consécutive à l'occurrence d'un risque technologique à proximité du site (explosion, incendie, accident) ayant pour conséquence l'endommagement des installations et/ou le déversement de produits toxiques.

Interventions humaines : une pollution externe d'origine humaine peut être le résultat d'un acte involontaire, à l'occasion par exemple d'une manipulation mal conduite ou mal contrôlée sur la boucle géothermale primaire, ou le résultat d'un acte de malveillance volontaire.

Le premier cas fera l'objet des recommandations particulières et sera traitée plus loin dans cette étude à l'occasion des recommandations générales qui seront faites concernant les procédures d'interventions pour la maintenance et l'entretien.

Le cas d'un acte malveillant relève à la fois du contrôle de l'accès au site et de la capacité technique que pourrait avoir un individu ou un groupe d'individu à intervenir sur le matériel concerné. Certaines précautions peuvent être apportées pour réduire ce risque. Elles font également partie des recommandations générales qui seront faites sur le fonctionnement de l'exploitation.

Risques naturels majeurs : parmi les risques naturels majeurs pouvant survenir dans la région parisienne, deux pourraient avoir un impact réel sur l'exploitation des ressources en eau profonde du bassin.

Le premier correspond à la présence d'anciennes excavations souterraines (naturelles ou anthropiques) situées sous ou à proximité du site. Outre le risque de voir se produire un éventuel effondrement de terrain, de telles cavités peuvent concentrer les eaux de ruissellement superficielles, provoquer des désordres lors de la réalisation des forages (pertes de circulation, mauvaise maîtrise des cimentations) et in fine faciliter le passage vertical de fluides dans les terrains le long de la colonne de forage. Ce risque devra impérativement être abordé lors de l'étude géotechnique du sous-sol préalable à la réalisation de la plate-forme de forage.

Le second, difficilement contrôlable quand il survient, correspond au risque d'inondation. L'envahissement du site de l'exploitation par des eaux superficielles, pouvant être fortement polluées, peut présenter un danger potentiel important de contamination de la nappe. Deux voies d'accès à ce type de pollution sont possibles : directement par la boucle géothermale primaire si celle-ci est ouverte au moment de la montée des eaux, ou par percolation plus ou moins rapide dans les annulaires ou les terrains proches du forage.

Il s'agira donc, dans la mesure du possible, d'éviter d'installer une opération sur un site réputé sensible au risque d'inondation. Cette information est normalement disponible dans le plan de prévention des risques naturels (PPRN) de la commune concernée. Dans le cas où le site ne peut être choisi en tenant compte de ce critère, il s'agira de pouvoir s'assurer de conserver la boucle strictement fermée si une inondation est attendue. Par construction, en-dehors des périodes d'intervention, la boucle géothermale est étanche et sous pression. Elle pourra donc être submergée sans conséquence particulière pour la nappe. On s'assurera toutefois que les écoulements

prévus sur le site évitent une stagnation des eaux de ruissellement et en permettent une évacuation rapide.

Par contre, une attention particulière sera apportée à la construction des forages pour éviter qu'ils ne deviennent des drains privilégiés facilitant une percolation des eaux superficielles par les annulaires ou par les terrains situés dans l'environnement immédiat des forages. On prendra grand soin en particulier à la mise en place d'un tube guide garantissant l'étanchéité de la première dizaine de mètres de terrains traversés. On s'assurera également de la réalisation d'une cimentation de qualité à l'extrados des tubages lors de leur mise en place. La nécessité d'une étanchéité de bonne qualité entre surface et forage fait partie des recommandations particulières faites sur la construction de la plateforme, les têtes de puits et les cimentations des tubages.

Risques technologiques : l'endommagement des installations de surface à la suite d'un accident technologique majeur à proximité du site (explosion, incendie, accident, déversement de produits toxiques) peut conduire à une pollution des nappes. Les conditions de cette pollution sont les mêmes que dans le cas des risques majeurs : passage direct par la boucle primaire ouverte ou endommagée, ou percolation de produits liquides par les annulaires des forages ou le terrain. Pour limiter ce facteur de pollution, on s'assurera que l'exploitation n'est pas située dans un périmètre reconnu comme étant « à risques technologiques » (voir le PPR de la commune concernée). Dans le cas contraire, outre les précautions déjà décrites pour les risques naturels, des solutions particulières devront être trouvées pour limiter au maximum l'impact que pourrait avoir les accidents répertoriés dans le PPR sur les installations, en particulier sur le matériel constituant la boucle primaire : protection des têtes de puits, des conduites de surface, des échangeurs, maîtrise des écoulements superficiels, ...

La protection contre les risques technologiques s'appliquent non seulement aux têtes de puits et aux équipements de surface constituant la centrale de production d'énergie, mais également à l'ensemble du réseau primaire de surface reliant les forages du doublet.

3. Spécifications de la boucle géothermique

3.1. CONTRAINTES DE LA RÉINJECTION

Réintroduire l'eau dans le réservoir après son utilisation thermique est la première contrainte à respecter pour conserver la disponibilité de la ressource pour un usage de sécurité de l'alimentation en eau potable. Il faut donc réinjecter l'eau refroidie dans l'aquifère à une distance suffisante du puits de production pour que l'exploitation thermique de l'aquifère ne soit pas perturbée par l'extension de la zone froide créée par cette réinjection.

Les calculs montrent qu'en fonction des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir de l'Albien et des paramètres des exploitations géothermiques (débits, températures de rejet) l'écart entre les deux puits doit être compris entre 500 m (minimum) et 700 m (optimum) pour que les interférences ne soient pas sensibles pendant la durée de l'exploitation, c'est-à-dire entraînant une baisse de température au puits de production qui n'excéderait pas 1°C en 25 à 30 ans.

Compte tenu de la profondeur du toit de l'Albien, un tel écartement peut difficilement être obtenu à partir d'une même plate-forme au moyen de forages déviés.

La méthode classique de déviation consiste à réaliser une chambre de pompage verticale, puis à provoquer la déviation avec un rayon de courbure acceptable pour descendre les cuvelages. Dans le cas présent, compte tenu de la profondeur du réservoir, l'angle à atteindre sur les forages serait supérieur à 60°. La conduite d'un tel doublet dévié serait une opération particulièrement délicate et probablement hors de proportion avec les objectifs d'un projet géothermique à basse température.

Une autre méthode pourrait consister à réaliser des forages inclinés depuis la surface. Dans ce cas, l'inclinaison nécessaire ne dépasserait pas 30°. Cette technique n'est toutefois pas courante : à notre connaissance aucun forage géothermique incliné depuis la surface n'a encore été réalisé dans le monde à une telle profondeur. Cette technique particulière pose d'autre part des problèmes variés, dont la disponibilité du matériel capable de réaliser de tels ouvrages et surtout la difficulté que présenterait un puits incliné pour la mise en place des pompes et du matériel d'exhaure.

Sauf cas particulier à étudier avec soins, on s'orientera donc vers la réalisation de deux puits verticaux sur deux plates-formes différentes séparés de 700 m environ. Les têtes de puits seront reliées entre elles par une conduite. On essaiera d'optimiser l'interconnexion en lui faisant, par exemple, emprunter le même parcours que le réseau de distribution de chaleur.

Si la disponibilité des terrains ne permet pas une implantation à la verticale des objectifs visés, on cherchera à optimiser au mieux les programmes de déviation. Une solution qui peut être recommandée est de conserver autant que possible le forage de

production vertical et de réaliser le forage d'injection en déviation : ce choix permet en effet de démarrer la déviation plus tôt (pas de contrainte de chambre de pompage verticale dans le forage d'injection) et apporte une meilleure injectivité en accroissant l'épaisseur apparente du réservoir.

Récapitulatif des différents cas envisageables :

2 puits verticaux	2 plates-formes situées à l'aplomb des cibles visées dans le réservoir
1 puits vertical et 1 puits dévié	2 plates-formes dont l'une n'est pas situées exactement à l'aplomb de la cible visée
2 puits faiblement déviés (< 30 °)	2 plates-formes qui ne sont pas nécessairement situées exactement à l'aplomb des cibles visées
2 puits fortement déviés (> 60 °)	1 plate-forme unique pour le doublet
2 puits inclinés (~ 30 °)	1 plate-forme unique pour le doublet

Outre la contrainte d'écartement entre les puits de production et d'injection, il faut noter un élément encore très peu connu à ce jour : **la capacité de réinjection** dans les formations sableuses de l'Albien ou du Néocomien.

Les opérations en cours effectuent des prélèvements de calories sans réinjecter les fluides pompés dans la nappe. Un seul test a été effectué sur la nappe de l'Albien : il s'agit du forage de Noisy-le-Grand. Sur ce forage, les résultats ont été relativement positifs puisqu'il a montré qu'il était possible de réinjecter un débit de 110 m³/h pendant 6 mois sans qu'aucun phénomène de colmatage n'apparaisse.

Toutefois, cet essai n'a pas été effectué avec l'eau du réservoir, mais en utilisant de l'eau de surface provenant de l'usine de traitement de Neuilly-sur-Marne.

Par contre, aucune connaissance n'est disponible sur le Néocomien. Cet aquifère ayant une granulométrie encore plus faible que celle de l'Albien, on peut lui supposer une capacité de réinjection moindre.

On notera d'autre part qu'un simple test d'injectivité dans des formations sableuses fines, et parfois même argilo-sableuses, ne peut pas être considéré comme vraiment révélateur de la capacité d'injection réelle en exploitation de longue durée. Une baisse progressive de l'injectivité a en effet été souvent observée dans des formations poreuses similaires. Diverses raisons ont été avancées pour expliquer cette évolution, en particulier :

- un colmatage dû au réarrangement des particules argileuses dans l'environnement immédiat du forage ;
- une diminution progressive de la porosité de la formation provoquée par des dépôts provenant d'une précipitation chimique de l'eau dont l'équilibre physico-chimique (pression, température) est modifié lors de son passage dans la boucle ;

- un colmatage in situ par le développement de produits bactériens ;
- un colmatage par des résidus de corrosion des forages, ces particules étant transportés dans la boucle par le fluide ;
- une diminution de la porosité efficace consécutive au piégeage croissant de micro-bulles de gaz.

Compte tenu du manque d'informations disponibles, **il apparaîtrait donc judicieux d'étudier, sur un doublet expérimental, les capacités de réinjection dans ces nappes et d'en suivre les évolutions long terme** avant d'envisager le lancement d'un nombre d'opérations géothermiques conséquent.

3.2. CONTRAINTES DE SURFACE

Les forages géothermiques captant les nappes de l'Albien ou du Néocomien en région parisienne seront le plus généralement réalisés en milieu urbain dense, avec des contraintes de surface pouvant parfois être très importantes, en particulier pendant la période de réalisation des forages. En effet, l'implantation d'un chantier de forage relativement profond (entre 600 m et 1 000 m) en zone urbaine ne peut s'envisager sans prendre en compte de nombreux paramètres qui devront faire l'objet au préalable d'une étude de faisabilité approfondie.

Un chantier de forage est avant tout constitué d'une plate-forme qui accueille la machine de forage proprement dite et l'ensemble de ses équipements annexes (tiges, outils, pompes, abris de chantier...). Elle sert également à stocker le matériel qui sera installé dans le forage (tubages, crépines), les produits utilisés au cours du chantier (fluides de forage par exemple) et à recevoir les bassins de stockage et de traitement des fluides de forage (bourbiers) et des eaux d'essais.

La surface nécessaire pour implanter un chantier de forage profond va en partie dépendre du type de machine de forage utilisée (et/ou disponible sur le marché). On peut considérer que l'emprise totale nécessaire à l'installation d'une plate-forme de forage est comprise entre 5 000 m² (stricte minimum requis avec une machine optimisée) et 8 000 m² (machine lourde). Strictement parlant, la surface n'est pas la donnée la plus contraignante. C'est plutôt les dimensions du terrain qui doivent permettre les manœuvres de relèvement ou de rabatement du mât et son haubanage. Dans une configuration idéale, cela représente un rectangle de 100 m d'un côté par 50 m à 80 m de l'autre.

Pour mémoire le périmètre de protection anti-déflagration qui impose, lorsqu'il est exigé, des mesures de sécurité spécifiques dans un diamètre de 30 m autour de la tête de puits, doit impérativement se situer dans l'enceinte du chantier.

Par la suite, pendant la période d'exploitation des ouvrages, cette surface pourra être réduite. Mais, les accès et une aire de maintenance suffisante (environ 1 000 m², soit un rectangle 40 m par 25 m) devront être conservés afin de pouvoir intervenir avec du matériel et des moyens d'entretien adaptés (manutentions des pompes, mesures et

contrôles du forage, nettoyages des tubages ou des crépines, curages du fond de puits).

La plate-forme doit être horizontale sur quasiment toute sa surface et doit permettre la circulation d'engins lourds. Son implantation doit tenir compte de la présence de lignes électriques aériennes, des réseaux enterrés passant sur le site ou en bordure du site (eau, gaz, électricité, eaux usées, pluvial, galeries de métro), d'éventuels couloirs de circulation aérienne (contrainte d'altitude, signalisation spécifique pour le mât de forage) et de la possibilité d'accéder au site pour des engins hors gabarit. Elle devra d'autre part pouvoir disposer des caractéristiques géotechniques nécessaires tant en surface (capacité statique pour supporter les efforts pendant la foration et capacité de roulement pour les engins) qu'en profondeur (présence de cavités souterraines naturelles ou anthropiques).

Enfin, du fait de certaines nuisances provoquées par le chantier (bruit, odeur, circulation de camions et d'engins, rejets divers), on devra tenir compte des conditions environnementales préexistant autour du site choisi (habitat en particulier). Pour des raisons de sécurité propres à l'activité de forage, un chantier de ce type doit pouvoir fonctionner sans interruption de jour comme de nuit et ne peut s'arrêter que dans certaines conditions précises. Le bruit en particulier sera un facteur important à prendre en compte dans le choix du site. Il pourra être également un critère de sélection de la machine de forage utilisé (capotage des moteurs, insonorisation spécifique, type de motorisation). Ainsi par exemple une machine de type diesel-électrique dont les équipements seraient capitonnés et insonorisés, même si elle est plus coûteuse, pourra être préférée à une machine classique. La maîtrise du bruit fera également partie des éventuelles conditions qui pourraient être imposées par le Maître de l'ouvrage (ou par arrêtés administratifs, se référer en particulier à la Circulaire du 21 juin 1976 relative au bruit des installations classées pour la protection de l'environnement) au fonctionnement du chantier ou au phasage de certaines manœuvres particulièrement bruyantes.

Parmi les contraintes de surface à prendre en compte, on retiendra également la situation de la plate-forme vis-à-vis des risques naturels majeurs et des risques technologiques pouvant exister dans l'environnement immédiat du site. Ces informations sont disponibles dans les Plans communaux de Préventions des Risques (PPR). Dans la mesure du possible, on évitera d'installer la plate-forme dans les périmètres concernés.

Pour des forages réalisés en région parisienne, le principal risque naturel est le risque d'inondation. Bien qu'une boucle géothermale primaire soit réputée étanche par construction, il est préférable, dans la mesure du possible, d'éviter d'implanter des forages dans de telles zones. À défaut, on pourrait être amené à prendre des mesures adaptées pour éviter d'éventuelles contaminations. Les deux principales actions pour y remédier sont :

- de s'assurer de disposer de têtes de puits et d'annulaires étanches, pour que le forage ne se comporte pas comme un drain vertical préférentiel en cas de submersion des ouvrages. On prendra en particulier un grand soin à la réalisation

des équipements de génie civil de surface, aux avant-puits et aux cimentations des tubages afin d'assurer une parfaite étanchéité au droit et autour du forage ;

- de mettre en place des procédures de fonctionnement et de maintenance adaptées afin de s'assurer qu'aucune pollution ne puisse avoir lieu en cas d'inondation des installations.

Le risque technologique vis-à-vis des forages devra être évalué au cas par cas. Les installations de surface devront prévoir des protections adaptées aux risques observés afin d'éviter un endommagement de la boucle ou de l'exploitation qui pourrait aboutir à une pollution de la ressource. Les protections à envisager varieront selon le risque observé. Elles concerneront :

- la protection physique contre un endommagement de la boucle, de la tête de puits et des réseaux. Cette protection peut être envisagée par exemple en enterrant tout ou partie de la tête de puits et des conduites du réseau primaire, ou en installant des équipements capables de restreindre les effets des risques reconnus (murets, murs ou bâtiments de protection, ...) ;
- la protection contre le déversement de produits toxiques peut être améliorée par un contrôle efficace des ruissellements superficiels et un bon dimensionnement des écoulements du site ;
- autant que nécessaire, un contrôle strict des accès renforcera la sécurité du site en évitant des actes involontaires ou volontaires de détérioration de la boucle primaire qui pourraient conduire à une pollution de la nappe captée.

Une décision importante sera celle de choisir entre la réalisation d'un doublet de forages sur une même plate-forme (le forage de production et le forage de réinjection sont tous les deux situés sur une même plateforme) ou la réalisation des deux forages à distance l'un de l'autre sur deux plates-formes différentes.

Réaliser un doublet sur une même plate-forme impose la réalisation de deux forages déviés. Compte-tenu des inclinaisons nécessaires (de l'ordre de 60° ou plus) pour obtenir l'écartement souhaité, cette opération peut s'avérer complexe, délicate et nettement plus onéreuse à réaliser que pour des forages verticaux. En contrepartie, il ne faut qu'une seule et même plate-forme et la longueur de la boucle de surface est réduite à son minimum (une dizaine de mètres sépare physiquement les deux têtes de puits).

Dans l'autre cas, si les emplacements sont correctement positionnés, il est possible de réaliser des forages verticaux. Il faut alors prévoir de réaliser deux plates-formes de forage et de mettre en place un long réseau de surface pour connecter le puits de production au puits d'injection (les deux têtes de puits sont alors distantes d'environ 700 m). Le surcoût engendré par la plate-forme supplémentaire et la plus grande longueur du réseau de connexion peut parfois dépasser l'écart de coût que l'on pourrait avoir entre forages déviés et forages verticaux.

Récapitulatif des contraintes de surface :

Surface	De 5 000 à 8 000 m ² Surface horizontale plane Deux sites (production et injection)
Aérien	Lignes électriques Couloir de circulation aérien
Sous-sol	Réseaux enterrés Cavités souterraines
Géotechnique	Capacité statique Capacité de roulement
Accès	Engins hors gabarit Engins lourds
Environnement	Habitat Bruit Circulation de véhicules Nuisance diverses (odeurs, rejets) Risques chantier
Exploitation	Risques naturels majeurs Risques technologiques Accès

3.3. CONCEPTION DES PUIXS DE PRODUCTION

Les forages sont conçus sur la base :

- d'une coupe technique établie en fonction de la géologie locale et des objectifs fixés (réservoir, cible visée, débit attendu, ...) ;
- éventuellement d'un programme de déviation si le puits doit atteindre une cible situé en dehors de la verticale du forage ;
- d'un programme de tubage définissant pour chaque tubage mis en place sa longueur et ses caractéristiques mécaniques ;
- d'un programme de cimentation définissant les moyens à mettre en œuvre pour assurer une bonne cimentation entre chacun des tubages et les terrains traversés ;
- d'un programme de boue définissant le type, les caractéristiques et les paramètres des fluides de forage utilisés ;
- d'un programme de diagraphies enregistrant les paramètres de la foration, les caractéristiques des terrains traversés et celles du réservoir ;

- d'un programme de complétion qui définit la façon dont le réservoir sera exploité et testé.

La conception des puits de production géothermiques à l'Albien-Néocomien du Bassin parisien doit normalement répondre aux objectifs suivants :

- atteindre et traverser les réservoirs géothermiques visés. Suivant les implantations géographiques, la nappe de l'Albien se situe à une profondeur comprise entre 450 et 750 m. L'épaisseur du réservoir est au maximum de 100 m, avec une épaisseur utile de 30 à 50 m. La nappe du Néocomien est située environ 150 m plus profond. Les forages se situeront donc dans une gamme allant de 550 à 1 000 m de profondeur. Pour la suite de cette étude on considèrera que la ressource géothermique est captée dans un réservoir situé entre 700 m et 800 m de profondeur ;
- être construit avec une colonne d'un diamètre suffisant pour fournir le débit d'exhaure attendu sans entrainer de pertes de charge excessives qui pourraient s'avérer coûteuses en énergie pendant l'exploitation de l'ouvrage. Avec un débit de l'ordre de 150 à 200 m³/h, il faut prévoir un tubage de production ayant un diamètre minimum de 7" (soit 159.4 mm de diamètre intérieur pour un casing API standard) ;
- disposer d'une chambre de pompage verticale où sera installée la pompe d'exhaure. Un tubage 9⁵/₈ (soit 226.6 mm de diamètre intérieur pour un casing API standard) est un minimum pour installer une pompe immergée suffisamment puissante pour permettre le débit requis en exploitation ;
- dans le cas particulier de l'Albien-Néocomien, pour éviter la corrosion des tubages tout en évitant une contamination de l'eau par des produits inhibiteurs, on sera amené à installer des tubages en matériaux composites inertes (fibre de verre) ou en acier inoxydables ou revêtu. Il sera donc proposé de réaliser le forage en deux étapes : une première étape de construction de l'ouvrage en tubages acier standard permettant de résister aux contraintes mécaniques de la foration (étanchéité, profondeur, déviation) et une deuxième étape qui verra l'équipement du forage avec un tubing spécifique (éventuellement amovible) en matériau inerte au travers duquel se fera la production de l'eau géothermale ;
- d'autre part, deux cas de forage seront envisagés : les forages verticaux et les forages déviés. On ne s'attachera qu'à la méthode classique avec chambre de pompage verticale et on laissera de côté, faute d'antécédent, les forages inclinés depuis la surface.

3.3.1. Programme sommaire du forage de production vertical

- Avant trou (0-35 m) : cet avant trou sera réalisé en même temps que la plate-forme de forage, éventuellement avec les moyens d'une machine de forage spécifique. Il devra isoler les formations superficielles meubles (remblais récents, quaternaire) et assurer une étanchéité vis-à-vis des écoulements superficielles autour de la future tête de puits. Sa profondeur dépendra de l'épaisseur des formations non consolidées au droit du site. Une vingtaine de mètres est en général recommandée

pour assurer une bonne étanchéité dans les terrains superficiels. Forage en 24" jusqu'à 35 m de profondeur. Pose et cimentation d'un tubage 18"5/8.

- Phase 17"½ (35-300 m) : forage en 17"½. Mise en place d'un casing API 13"3/8 en acier de grade K55, cimenté à l'extrados sur toute sa hauteur. Ce tubage accueillera la future chambre de pompage.
- Phase 12"1/4 (300-700 m) : forage en 12"1/4. Mise en place d'un casing API 9"5/8 au toit du réservoir. Ce tubage est suspendu par un « liner-hanger » à la base du tubage 13"3/8 et cimenté à l'extrados.
- Option : les phases 17"½ et 12"1/4 peuvent être regroupées en une seule opération, en particulier dans les forages les moins profonds. On installera alors un tubage mixte 13"3/8 x 9"5/8 d'un seul tenant. L'avantage est d'avoir un tubage continu entre réservoir et surface.
- Phase 8"½ (700-800 m) : forage en 8"½ dans le réservoir. Élargissage en 12"1/4 des zones productrices. Mise en place de crépines inox 6"5/8 suspendues à la base du tubage 9"5/8. Mise en place du massif de gravier.
- Mise en eau du puits, stimulations éventuelles, essais de production.
- Mise en place de la complétion d'exploitation en fibre de verre. Cette complétion est constituée d'une chambre de pompage sur 250 m (tubing 229.9 / 196.6 mm), prolongée d'un tubing de production 176.0 / 150.6 mm jusqu'en tête des crépines. Un produit inhibiteur non toxique est mis en place dans l'annulaire entre casing acier et tubing fibre de verre.

3.3.2. Programme sommaire du forage de production dévié :

Le programme du forage de production dévié sera identique à celui du forage vertical (hormis l'option qui n'est pas envisageable). Le début de la déviation (le point de départ est appelé « kick-off point », la phase de prise d'angle « build-up ») se fera au début de la phase 12"1/4 à 300 m de profondeur. Le puits sera ensuite poursuivi en déviation contrôlé jusqu'au réservoir.

3.4. CONCEPTION DES PUIXS DE RÉINJECTION

Les puits d'injection géothermiques ont les spécificités suivantes :

- d'avoir un diamètre suffisant pour fournir le débit d'injection attendu sans entrainer de pertes de charge excessives qui pourraient s'avérer coûteuses en énergie pendant l'exploitation. Comme pour le forage de production, le diamètre minimum requis est de 7" ;
- dans le cas spécifique d'un possible usage AEP (alimentation en eau potable) de l'Albien/Néocomien, on rajoutera l'éventualité de pouvoir transformer facilement un puits de réinjection en puits d'alimentation en eau. Deux possibilités sont

envisageable pour réaliser cette transformation : soit on construit un puits avec chambre de pompage identique au « puits de production » (voir le programme ci-dessus), soit on se contente d'installer une pompe d'un plus petit diamètre au détriment d'un débit moins important ;

- comme pour le puits de production, deux cas de forage seront envisagés : les forages verticaux et les forages déviés.

3.4.1. Programme sommaire du forage d'injection vertical

- Avant trou (0-35 m) : cet avant trou sera réalisé en même temps que la plate-forme de forage, éventuellement avec les moyens d'une machine de forage spécifique. Il devra isoler les formations superficielles meubles (remblais récents, quaternaire) et assurer une étanchéité vis-à-vis des écoulements superficiels autour de la future tête de puits. Sa profondeur dépendra de l'épaisseur des formations non consolidées au droit du site. Une vingtaine de mètres est en général recommandée pour assurer une bonne étanchéité dans les terrains superficiels.

Forage en 24" jusqu'à 35 m de profondeur. Pose et cimentation d'un tubage 18^{5/8}".

- Phase 17^{1/2}" (35-150 m) : forage en 17^{1/2}". Mise en place d'un casing API 13^{3/8}" en acier de grade K55, cimenté à l'extrados sur toute sa hauteur.
- Phase 12^{1/4}" (150-700 m) : forage en 12^{1/4}". Mise en place d'un casing API 9^{5/8}" au toit du réservoir. Ce tubage est suspendu par un « liner-hanger » à la base du tubage 13^{3/8}" et cimenté à l'extrados.

Option : la phase 17^{1/2}" peut être supprimée, en particulier dans les forages les moins profonds. On installera alors le seul tubage 9^{5/8}" de la surface jusqu'au réservoir.

- Phase 8^{1/2}" (700-800 m) : forage en 8^{1/2}" dans le réservoir. Élargissement en 12^{1/4}" des zones productrices. Mise en place de crépines inox 6^{5/8}" suspendues à la base du tubage 9^{5/8}". Mise en place du massif de gravier.
- Mise en eau du puits, stimulations éventuelles, essais de production.
- Mise en place de la complétion d'exploitation en fibre de verre. Cette complétion est constituée d'une chambre de pompage sur 250 m (tubing 229.9 / 196.6 mm), prolongée d'un tubing de production 176.0 / 150.6 mm jusqu'en tête des crépines. Un produit inhibiteur non toxique est mis en place dans l'annulaire entre casing acier et tubing fibre de verre.

3.4.2. Programme sommaire du forage d'injection dévié

Le programme de forage d'injection dévié sera identique à celui du forage vertical (hormis l'option qui n'est pas envisageable). Le début de la déviation pourra se faire au

début de la phase 12ⁿ/4 à partir de 150 m de profondeur. Le puits sera ensuite poursuivi en déviation contrôlé jusqu'au réservoir.

3.5. CHOIX DES MATÉRIAUX

3.5.1. Discussion sur les choix des tubages

Les casings (cuvelages ou tubages) généralement utilisés par les pétroliers pour réaliser des forages profonds, ont pour principaux rôles de :

- soutenir les parois du forage (résistance mécanique) ;
- isoler et protéger les zones non captées (étanchéité) ;
- transporter les fluides entre le réservoir et la surface (conduit) ;
- accueillir du matériel de mesure ou/et de production (pompe) ;
- supporter différentes contraintes pendant les interventions de forage, de maintenance et de servicing.

Les tubages en **aciers de grade pétrolier** (K55, N80) répondent bien à ces obligations mais sont sensibles à diverses formes de corrosion. Pour limiter cette corrosion, des traitements chimiques et/ou des précautions préventives particulières doivent être mises en œuvre dans le cas de leur utilisation dans un contexte de fluides agressifs comme le sont généralement les fluides géothermaux. Les eaux des nappes de l'Albien et du Néocomien ayant la particularité d'être chimiquement peu agressives, la dégradation de ces tubages ne pourrait avoir lieu qu'à la suite d'une prolifération de bactéries anaérobies.

Les tubages en **aciers spéciaux** (inox AISI 316 L par exemple) résistent mieux à certains types de corrosion, mais sont souvent mécaniquement moins résistant, fragile vis-à-vis de certaines agressions mécaniques, difficile à mettre en œuvre et surtout extrêmement coûteux. Il paraît difficile d'en envisager l'utilisation comme cuvelage dans la construction des forages profonds, en particulier lorsqu'il s'agit de forages déviés. Leur utilisation est par contre assez fréquente comme matériaux pour les crépines.

Les tubages en **aciers revêtus** présentent les mêmes caractéristiques mécaniques que les tubages acier de type pétrolier et, du fait de leur revêtement intérieur, peuvent être rendus insensibles à la corrosion (sous réserve d'une mise en œuvre parfois délicate au niveau des raccordements). Ils sont par contre extrêmement vulnérables aux actions mécaniques (chocs, poinçonnage, rayures, frottements) et de ce fait totalement incompatibles avec des actions de forage ou de servicing. On réservera donc leur usage à des complétions amovibles (tubings ou colonnes d'exhaure de pompe par exemple, colonne de production) dans lequel on ne descendra pas de matériel pouvant endommager le revêtement.

Les tubages en **matériaux inaltérables** (composite fibre de verre par exemple) présentent l'avantage d'être quasiment insensibles à la corrosion. Les fibres de verre peuvent parfois néanmoins réagir à certaines attaques chimiques, devenir poreux et/ou perdre leur cohésion (bullage, désolidarisation de la fibre et du liant). Mécaniquement les tubages en fibre de verre sont moins résistants que les tubages acier, ce qui impose des épaisseurs de matière plus importantes et des manchons surdimensionnés. D'où un encombrement nettement supérieur (pertes en diamètre intérieur pour un diamètre nominal donné). Comme les tubages revêtus, ils sont extrêmement sensibles aux agressions mécaniques, avec en particulier un risque de détérioration à partir des blessures. Comme pour ces derniers, on réservera leur utilisation en tant que tubings amovibles (colonne de pompage, chemisage de puits).

Les **jointts de tubage** seront choisis parmi ceux fournissant à la fois la résistance adaptée aux contraintes mécaniques subies lors de la mise en place du tubage et garantissant une étanchéité optimale de la colonne.

Les jointts de type API sont les filetages les plus standards. On les réservera aux tubages techniques.

Les jointts de type BUTTRESS présentent une meilleure étanchéité et permettent un vissage facile. On les recommandera pour les tubages de gros diamètre et pour ceux qui se trouveront en contact direct avec l'eau géothermale.

Les jointts de type VAM fournissent une étanchéité optimale. Ils seront donc particulièrement recommandés pour tous les tubages en contact direct avec l'eau géothermale.

Dans tous les cas, on veillera à appliquer scrupuleusement les couples de serrage recommandés par le constructeur. L'utilisation de clés de serrage hydrauliques est recommandée pour assurer un vissage homogène de toute la colonne au couple optimal fixé par le fabricant et éviter tout sous ou sur-serrage.

Conclusion et proposition

En conclusion, on peut retenir que l'usage des tubages en acier de grade pétrolier classique (type K55) paraît quasiment incontournable lors de la réalisation des forages profonds. Ils ne sont pas sensibles à la corrosion dans le contexte chimique des nappes de l'Albien et du Néocomien. Ils peuvent toutefois subir des dégradations dans le cas d'une prolifération de bactéries anaérobies. Un traitement anti-bactérien de l'ouvrage et un suivi biologique périodique devrait permettre de s'affranchir de ce risque. Des jointts de tubage de type VAM seront préférés pour les colonnes en contact avec le fluide géothermal.

Il est également tout à fait envisageable d'installer dans les forages, une fois ceux-ci réalisés, des colonnes (éventuellement amovibles) en matériaux inaltérables servant à la production et à l'injection des fluides. Cette solution permet d'éviter un contact direct entre l'acier des cuvelages et l'eau du réservoir géothermique. En contrepartie, elle impose la réalisation des forages dans des diamètres plus importants.

3.5.2. Choix des crépines

Les crépines ont pour rôles principaux de :

- soutenir les parois de la formation captée (résistance mécanique) ;
- servir de filtre en évitant le transport des particules solides ;
- maintenir en place le massif de gravier quand celui-ci est installé ;
- répartir au mieux et rendre aussi laminaire que possible les écoulements entre forage et formation.

Les aciers spéciaux (inox AISI 316 L par exemple) sont souvent utilisés dans la fabrication des crépines. Ils montrent une résistance mécanique le plus souvent suffisante pour ce type d'utilisation et résistent bien aux effets de la corrosion. Malgré une construction mécanique généralement plus fragile, l'utilisation de crépines en aciers spéciaux apparaît la plus fréquente dans les forages profonds. Les crépines peuvent être fabriquées selon plusieurs méthodes (fentes alternées, ouvertures repoussées, fil enroulé, etc.), chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. Des renforts adaptés peuvent être utilisés pour augmenter la résistance à l'écrasement afin de pouvoir répondre aux contraintes mécaniques rencontrées. Certains fabricants proposent également des massifs filtrants pré-installés à l'extrados des crépines.

Les composites (fibre de verre, acier revêtu) ainsi que certains matériaux inertes (PVC, polyéthylène) pourraient également être envisagés. Il apparaît néanmoins que la fabrication et la mise en œuvre de ces produits n'atteignent pas les possibilités de l'inox : l'encombrement est plus important à résistance mécanique égale, le pourcentage d'ouverture est généralement nettement inférieur, la sensibilité aux phénomènes d'érosion ou d'abrasion est plus forte.

Dans le cas des nappes de l'Albien et du Néocomien, nous préconiserons l'utilisation de crépines en acier inoxydable de type fil enroulé (wire-wrapped) adaptées à la granulométrie des formations captées (0,1 à 0,4 mm).

3.5.3. Cimentations

Une attention particulière doit être apportée à la cimentation des tubages. Celle-ci joue en effet un rôle important dans la qualité de construction des ouvrages, en remplissant en particulier les fonctions suivantes :

- protection de l'extrados du tubage contre la corrosion ;
- étanchéité verticale des annulaires ;
- répartition des contraintes mécaniques (écrasement, dilatation) ;
- participation à l'isolation thermique du forage.

L'isolation des aquifères traversés ou captés par le forage est principalement assurée par la cimentation des annulaires des différents tubages installés. Pour obtenir un résultat optimum, on cherchera :

- à obtenir un contact aussi étroit, continu et homogène que possible entre le terrain et le tubage : ce paramètre dépendra de la qualité du laitier de ciment utilisé (composition, rhéologie), des conditions de sa mise en place (déplacement du laitier dans l'annulaire) et de la qualité du centrage du tubage à l'intérieur du trou foré (en particulier en puits dévié) ;
- à réaliser une cimentation sur toute la hauteur du tubage. Pour atteindre cet objectif, il faudra s'assurer de pouvoir injecter un volume de laitier suffisant par rapport à la géométrie de l'ouvrage, avec une densité adaptée pour ne pas risquer une fracturation des formations traversées (risque de pertes empêchant la remontée du laitier) et en respectant une procédure de mise en place permettant un déplacement optimum du laitier pendant l'injection.

Une cimentation de tubage, dans son principe de base, consiste à fabriquer et injecter en continu un volume déterminé de laitier de ciment par l'intérieur du tubage, puis à pousser ce laitier de telle façon qu'il remonte à l'extérieur du tubage et remplisse l'espace annulaire entre le sabot de ce tubage et la surface.

Parmi les nombreux facteurs permettant d'obtenir une cimentation de qualité on retiendra :

- la qualité de la géométrie et de la préparation du forage avant la mise en place du tubage et sa cimentation, dépendant en particulier des paramètres de la foration et des fluides de forage (boues) utilisés ;
- le calcul des volumes de laitier : la réalisation d'un diamètreur avant la mise en place du tubage est impérative pour s'assurer du calcul des volumes de laitier à mettre en place ;
- le choix de la densité du laitier : le laitier devra être suffisamment dense pour conserver une qualité suffisante ($d = 1,75$ à $1,80$ pour un laitier classique) tout en ne l'étant pas trop pour risquer de dépasser la résistance mécanique des roches. Si l'estimation de la pression de fracturation des formations ne permet pas un laitier de densité suffisante, on devra s'orienter soit vers la fabrication de laitier spécifique à faible densité (ciment allégé, pouzzolane, foam-ciment), soit vers la réalisation de cimentations étagées ;
- le matériel de centrage du tubage : le nombre, l'emplacement et la qualité des centreurs devront être ajustés à la géométrie du forage (diamètres, trajectoire) de façon à conserver un annulaire aussi régulier que possible autour du tubage. Une attention particulière devra être apportée à compenser les contraintes liées à la déviation, contraintes pouvant provoquer des excentrations importantes dans le positionnement du tubage ;
- le type et la qualité du laitier : les caractéristiques rhéologiques du laitier sont primordiales pour assurer à la fois une mise en place correcte (déplacement) et un remplissage efficace de l'annulaire (cohésion entre terrain et tubage). Des ciments bentonitiques (quelques % de bentonite mélangée au laitier, 4 % est un bon

compromis) permettent par exemple un léger gonflement du mélange mis en place, assurant de ce fait un meilleur contact entre tubage et terrain sans que le ciment perde trop de sa résistance mécanique ;

- l'homogénéité du laitier au cours de sa fabrication : le laitier étant fabriqué en continu au fur et à mesure de son injection, on s'assurera que sa densité reste constante pendant le processus de fabrication ;
- une séparation efficace entre boue et laitier : il est préconisé de prendre toutes les dispositions nécessaires pour éviter une contamination du laitier par la boue au cours de la mise en place. En tête du laitier, on injectera un fluide séparateur (spacer) qui aura pour rôle de bien séparer la boue du laitier et de nettoyer l'annulaire avant l'arrivée du laitier. À la suite du laitier, on placera un bouchon mécanique (cement plug) que l'on poussera avec la boue jusqu'à son arrivée au sabot du tubage. Cette arrivée sera indiquée par une montée brutale de la pression. Le sabot du tubage disposera d'un clapet anti-retour interdisant un retour en arrière du laitier. L'ensemble (sabot, bouchon, anti-retour) sera reforcé à l'issue de l'opération ;
- un déplacement progressif et sans à-coup facilitera une bonne mise en place du laitier ;
- l'attente de séchage du ciment (WOC) devra être suffisante (généralement au moins de 48 h, 72 h si possible) et sera confirmée par la conservation d'échantillons de laitier. On évitera toute intervention prématurée qui pourrait avoir un effet néfaste sur l'accrochage du ciment. On s'abstiendra en particulier de descendre le train de tiges dans le forage avant de s'être assuré d'un séchage complet du ciment ;
- des contrôles permettent de vérifier la qualité de la cimentation. Deux méthodes sont couramment employées : le log de température et le log CBL (Cement Bond Log). Le log de température permet de localiser le sommet d'une cimentation lorsque celle-ci n'est pas remontée jusqu'en surface. Le CBL, qui est une diagraphie sonique, permet de déterminer une certaine « qualité » de la cimentation en mesurant la continuité entre acier, ciment et terrain ;
- une cimentation complémentaire pourra éventuellement avoir lieu, lorsque nécessaire, afin d'assurer une étanchéité aussi parfaite que possible de la partie supérieure de l'annulaire du tubage. Cette cimentation est généralement réalisée en coulant un laitier dense, soit directement depuis la surface, soit au moyen d'une ligne d'injection descendue dans l'annulaire.

Conclusion et recommandation

Les cimentations des tubages devront faire l'objet d'une attention et d'un suivi particulier afin d'obtenir une qualité optimum de réalisation garantissant la protection du forage et de la ressource. Il sera donc impératif d'utiliser tous les moyens techniques et de suivre les règles de l'art dans ce domaine.

3.5.4. Fluides de forage

Les fluides de forage (parfois dénommées « boues de forage ») sont un des éléments essentiels à prendre en compte dans la conduite des travaux de foration. On en trouve aujourd'hui de type extrêmement variées (bentonitique, polymères dégradables, émulsion inverse, saumure, ...) que l'on choisit phase par phase en fonction des problématiques à résoudre et des objectifs assignés aux forages. Outre leurs rôles bien connus pendant l'ensemble des actions de forage proprement dites (dont les principaux sont la tenue des parois, la remontée des déblais, la lubrification et le refroidissement des outils), ils interagissent directement sur les terrains traversés et sont un vecteur permanent entre le sous-sol et la surface. En ce qui concerne spécifiquement la problématique définie pour l'Albien-Cénomaniens, on retiendra :

- le rôle important, déjà mentionné plus haut, joué par les fluides de forage dans la qualité des cimentations des tubages, et donc dans la qualité de l'étanchéité des ouvrages. On a vu l'importance d'une bonne préparation des parois du forage préalablement aux opérations de cimentation (rôle joué dans l'obtention de parois bien calibrés et dans la mise en place du laitier) ;
- l'impact que peut avoir le fluide de forage comme vecteur de transmission entre surface et sous-sol. Cet impact peut être particulièrement important lors de la phase de forage du réservoir, phase pendant laquelle il se trouve directement en contact avec la ressource.

Les deux impacts négatifs les plus fréquents que l'on peut envisager au niveau du réservoir sont un colmatage de la formation, pouvant entraîner une baisse de la productivité des ouvrages, ou inversement une invasion du réservoir par les fluides de forage. Dans ce dernier cas, une des conséquences peut être une pollution plus ou moins importante et permanente de la ressource.

La pollution de la ressource par les fluides de forage peut survenir soit par pénétration du fluide dans la formation (contamination chimique directe), soit par l'introduction via le fluide d'éléments exogènes (contamination bactérienne). Des précautions doivent donc être prises pour s'affranchir de ces risques :

- contamination chimique : une contamination chimique de la ressource peut survenir lorsque les fluides de forages envahissent le réservoir. Quand la pression de la colonne de boue devient supérieure à la pression de gisement du réservoir, il peut survenir une « perte » partielle (une part seulement remonte en surface) ou totale (il n'y a aucun retour en surface) des fluides de forage. Ce phénomène peut également survenir en traversant des zones fracturées ou karstiques. Lorsqu'une perte survient, des quantités importantes de produits (pouvant aller jusqu'à plusieurs fois le volume total du forage, soit plusieurs dizaines de m³) sont alors introduites dans la formation qu'ils peuvent contaminer.

L'Albien-Cénomaniens étant une formation sableuse, ni fracturée ni karstique, la contamination chimique devrait rester un phénomène relativement mineur, restreint à un volume très réduit autour du forage. Elle peut donc facilement être combattue, d'une part en utilisant des fluides de forage non polluants (saumures, polymères

dégradables), d'autre part en veillant à repomper très largement les volumes injectés ou perdus lors des opérations de mise en production du puits ;

- contamination bactériologique : c'est un effet indirect de la mise en contact des fluides de forage avec les fluides de la formation. Que ce contact soit important (cas des pertes partielles ou totales) ou limité aux seuls parois du forage, il peut suffire à introduire des germes bactériens qui, dans certains cas favorables, pourront continuer à se développer dans le réservoir. Pour éviter une telle contamination, qui peut être ou non pathogène, il s'agira de déterminer les bactéries pouvant avoir la capacité de se développer dans les milieux concernés (formations géologiques, aquifères, conditions de température et de pression) et d'empêcher leur introduction par le biais des fluides de forage. Pour cela, pendant la phase de forage du réservoir, on utilisera des fluides de forage adaptés traités avec des produits bactéricides adéquats permettant de détruire les souches bactériennes visées. Outre ce traitement permanent des fluides de forage, un traitement bactéricide complémentaire spécifique pourrait être également envisagé à la fin de la mise en production du puits, ou pendant l'installation des tubings de production. On traitera systématiquement par exemple la saumure utilisée pour les opérations de contrôle du puits.

Conclusion et recommandations

Les précautions en ce qui concerne les fluides de forage concernent donc la qualité des parois du forage et du déplacement du laitier en vue d'obtenir une cimentation optimum des tubages. D'autre part l'ensemble des fluides (boues, saumures, eau) utilisés à partir de la phase de forage du réservoir et jusqu'à la mise en production définitive de l'ouvrage (mise en place de la pompe) devra subir un traitement bactéricide systématique pour prévenir d'une éventuelle contamination bactériologique de la nappe et assurer en même temps la désinfection du matériel descendu dans le forage (train de tiges, équipements de mesure) et celle des éléments constitutifs du forage (crépines, tubages, tête de puits).

3.6. PROCÉDURES ET PRÉCAUTIONS DE RÉALISATION DES FORAGES

Pour réaliser des ouvrages captant la ressource géothermique des nappes de l'Albien et du Néocomien tout en préservant et en protégeant la ressource en eau potable de toute pollution, il est proposé, en complément d'un choix particulier des matériaux, d'appliquer pour les travaux envisagés un ensemble de procédures et de précautions spécifiques.

3.6.1. Plate-forme de forage

Compte-tenu des contraintes qui ont été décrites plus haut, la plate-forme de forage apparaît comme le premier élément, et un des plus contraignants, dans le processus de réalisation des forages. Le choix de son implantation s'avère tout particulièrement important pour assurer un bon déroulement des travaux et la sécurité des ouvrages. Outre une surface suffisante, les contraintes environnementales devront faire l'objet d'études approfondies afin de limiter au mieux les risques pour le chantier.

Nous préconisons en particulier une étude rigoureuse des impacts que pourraient avoir, tant pendant la durée du chantier que pendant l'exploitation de la ressource géothermale, une exposition aux risques environnementaux et technologiques. Sur la base de cette étude préalable, si cela s'avère nécessaire, des précautions particulières et des procédures de mises en sécurité pourront être imposées pendant la durée du chantier chantiers de forage, et plus tard à l'exploitation de la ressource.

Dans sa construction, la plate-forme de forage inclut le forage d'un avant-puits en gros diamètre couvrant au moins les vingt premiers mètres de terrains superficiels non consolidés (remblais, terrains quaternaires récents). Cet avant-puits joue un rôle important dans la protection et l'étanchéité du futur forage face aux eaux superficielles (ruissellement, inondation) qui pourraient profiter de cet espace pour pénétrer en profondeur.

On portera donc une attention particulière à réaliser une bonne cimentation du tubage constituant cet avant-puits afin d'assurer la meilleur étanchéité possible au droit des terrains superficiels et en tête de puits.

Il en est de même de la construction de la « cave », centrée sur le forage, qui recevra la tête de puits définitive. Cette cave devra être totalement étanche. Elle sera entourée de caniveaux pour dévier autant que possible les eaux de ruissellement. Lorsque le forage sera terminé, elle sera équipée d'une pompe vide-cave automatique autorisant un assèchement permanent.

3.6.2. Fluides de forage

Pendant les travaux de forage du réservoir géothermique, le fluide de forage constitue un lien direct entre la ressource et la surface. Il est donc un des vecteurs potentiels privilégiés d'une éventuelle contamination chimique ou biologique de la nappe aquifère.

Pour éviter un tel risque de contamination, on s'assurera que les fluides utilisés lors de la phase de forage du réservoir, tout en restant compatibles avec les nécessités de la foration, soient chimiquement non polluants (comme les saumures et les polymères dégradables) et systématiquement traités au moyen de bactéricides adéquats.

En fin de travaux, au moment de la mise en eau définitive du puits, on s'assurera d'un traitement bactéricide complet (désinfection) de l'ensemble du puits préalablement à la mise en production de la boucle géothermale.

Un traitement bactéricide des fluides utilisés devra également être envisagé lors des opérations post-forage pendant lesquels du matériel est descendu à l'intérieur du puits : enregistrement de mesures, opérations de développement et de stimulation, opération de maintenance et de nettoyage ...

3.6.3. Cimentations

Comme il a déjà été vu précédemment, la qualité de la cimentation des tubages est un des éléments clé pour assurer la protection des tubages, une étanchéité verticale des annulaires et donc une bonne protection de la ressource vis-à-vis d'une contamination depuis la surface ou par une autre nappe.

On prendra donc un soin particulier à l'élaboration des programmes de cimentation, en portant une attention particulière aux éléments suivants :

- ***calibration du forage dans la phase de forage ;***
- ***évaluation des volumes de ciment au moyen d'un log de calibration ;***
- ***centrage effectif du tubage, surtout en puits dévié ;***
- ***qualité de fabrication du laitier de ciment utilisé ;***
- ***injection d'un spacer avant le pompage du laitier ;***
- ***fabrication homogène et déplacement sans à-coup du laitier de façon à assurer une bonne mise en place du laitier dans l'annulaire ;***
- ***attente de séchage du ciment pendant 48 hsans intervention sur le tubage ;***
- ***prise d'échantillons de contrôle ;***
- ***contrôle de cimentation (CBL, thermométrie si nécessaire) ;***
- ***en cas de besoin, prévoir une cimentation complémentaire de l'annulaire depuis la surface.***

Lors de la phase de forage, il s'agira de réaliser un forage aussi bien calibré que possible en adaptant les fluides de forage et les paramètres de foration aux formations traversées. La qualité de la boue, son débit et ses paramètres rhéologiques (viscosité, filtrat) seront particulièrement contrôlés pour atteindre cet objectif et permettre par la suite un bon déplacement du laitier.

La qualité du laitier de ciment mis en place (densité en particulier) devra être aussi constante que possible pendant sa fabrication. Dans la mesure du possible, on favorisera la fabrication de laitiers suffisamment dense (utilisation par exemple de ciments de type Portland avec une densité de laitier comprise entre 1,75 et 1,80). L'introduction de 3 à 4 % de bentonite entraîne un gonflement du ciment pendant le séchage favorisant une meilleure étanchéité, sans dégrader de façon sensible la résistance mécanique du ciment.

Pendant l'attente de séchage du ciment (WOC), afin d'éviter un décollement possible entre ciment et tubage, on évitera toute intervention qui pourrait avoir pour conséquence de faire bouger, d'ébranler ou de faire vibrer le tubage. Une durée de séchage suffisante sera observée (au moins 48 h).

3.6.4. Recommandations diverses

Dans la mesure du possible, au cours des travaux, on s'assurera de ***ne pas utiliser de produits pouvant contenir en quantité des éléments non dégradables ou ayant une toxicité permanente***. On portera une attention particulière à la constitution des produits suivants :

- aux fluides de forage dont certains constituants peuvent contenir du chrome, des hydrocarbures ou des polymères non dégradables ;
- aux graisses, utilisées pour les filetages des trains de tiges et des tubages, qui peuvent contenir du plomb ou des métaux lourds ;
- à certains bactéricides ou inhibiteurs de corrosion dont la toxicité peut s'avérer incompatible avec un usage AEP.

3.7. MISE EN PRODUCTION DES OUVRAGES

Les recommandations que l'on peut faire en ce qui concerne la mise en production des ouvrages sont essentiellement ***d'éviter au cours de ces opérations toute contamination chimique ou bactérienne de l'ouvrage et du réservoir***. On s'assurera donc que les fluides utilisés lors de ces opérations (eaux, saumures) sont non toxiques et systématiquement traités au moyen de produits bactéricides. On s'assurera également que les outils de forage, de contrôle ou de mesure qui seront introduits à l'intérieur du puits au cours de cette phase se trouveront systématiquement descendus et immergés dans un fluide pré-traité.

Les opérations de stimulation (traitements par acidification ou polyphosphates) devront être suivies par un dégorgement et un lessivage suffisant du puits (air-lift et/ou pompage et/ou artésien) pour assurer que la totalité des produits injectés ait été retirés du réservoir et de l'ouvrage.

Les inhibiteurs de corrosion qui seront éventuellement placés dans les annulaires entre casing en acier et tubing en fibre de verre, devront être non toxiques et compatibles avec une utilisation du forage pour l'alimentation en eau potable.

À la fin du chantier, le puits mis en production recevra un traitement bactéricide conservatif final et sera hermétiquement fermé en attendant la mise en exploitation de la boucle géothermale.

4. Équipements de production

4.1. TÊTES DE PUIITS

Les têtes de puits des forages géothermiques ont plusieurs fonctionnalités :

- elles assurent la fermeture hermétique du puits, ainsi que l'étanchéité en tête de forage dans le cas de nappes artésiennes jaillissantes ;
- elles contrôlent l'accès aux forages et les protègent des pollutions externes ;
- elles servent à la suspension du matériel de production et d'injection (éventuellement en matériaux composites) placés dans l'ouvrage ;
- elles servent également à la suspension du matériel d'exhaure installé dans les puits de production (pompe) ;
- elles permettent le contrôle de l'artésianisme des puits lorsqu'ils sont jaillissant, soit par l'utilisation des vannes, soit par injection dans le puits de fluides spécifiques de densité adéquate (saumure par exemple) permettant de compenser la pression des formations.

Les têtes de puits sont positionnées par des raccords à brides sur le tubage acier. Elles sont généralement constituées d'un ensemble plus ou moins complexe selon les usages de supports, d'une ou plusieurs vannes principales, de vannes secondaires latérales et de prises permettant le passage des instruments de contrôle et de mesure.

Les recommandations que l'on peut faire sur ce matériel concernent avant tout la qualité de fabrication des vannes et des revêtements (téflon, composites) utilisés pour protéger l'acier dans les parties en contact avec le fluide géothermal.

Un autre aspect important est d'assurer la protection physique de ce matériel contre d'éventuelles agressions externes (atteintes climatiques, interventions humaines, risques naturels et technologiques), tout en permettant un accès quand nécessaire. La tête de puits peut être :

- soit être entièrement installé sous le niveau du sol, à l'abri de la cave construite pour la réalisation du forage ;
- soit protégé en surface par une construction, dont tout ou partie serait éventuellement démontable pour permettre les interventions sur le puits.

4.2. POMPES ET COLONNES D'EXHAURE

Les systèmes de pompage utilisés en géothermie utilisent trois techniques différentes, fonction de la position de l'élément moteur :

- les pompes immergées dont le moteur électrique est immergé directement sous la partie hydraulique. C'est la technologie actuellement la plus utilisée ;

- les pompes à arbre long dont le moteur électrique est placé en surface. Il est raccordé à la partie hydraulique de la pompe au moyen d'un arbre d'entraînement. La présence de cet arbre rend leur installation difficile et délicate à grande profondeur ;
- les turbopompes entraînées par une turbine actionnée par une pompe en surface. Elles sont d'un rendement énergétique inférieur aux deux précédentes mais présentent généralement une durée de vie nettement supérieure aux pompes immergées.

L'exhaure des eaux géothermales est le plus souvent réalisée actuellement au moyen d'une pompe immergée dans le forage au niveau de la chambre de pompage. La profondeur d'immersion dépend du débit souhaité et des paramètres hydrodynamiques du réservoir. Dans le cas de l'Albien, la pompe devrait être installée entre 150 et 200 m de profondeur pour un débit de 200 m³/h.

Un corps de pompe immergée est constitué des éléments suivants :

- dans la partie basse du corps, un moteur électrique, dont le refroidissement est assuré par le passage de l'eau dans l'annulaire pompe-tubage ;
- au centre, une crépine d'aspiration par laquelle l'eau pénètre à l'intérieur de la pompe ;
- dans la partie haute du corps, le bloc contenant les turbines dont le nombre d'étages est fonction de la puissance de refoulement demandée ;
- un câble électrique alimentant le moteur ;
- en surface, un boîtier de commande électrique, comportant un éventuel variateur pour le contrôle du débit, et au moins un système de sécurité pour prévenir d'un dénoyage accidentel de la pompe.

La pompe est descendue au niveau requis de la chambre de pompage au moyen d'une colonne d'exhaure, l'ensemble étant maintenu suspendu au niveau de la tête de puits. La colonne d'exhaure est généralement constituée de tubes en fibre de verre ou en acier revêtu raccordés par vissage (plus rarement par brides). Le câble électrique d'alimentation du moteur de la pompe et les câbles auxiliaires éventuels sont fixés le long de la colonne au fur et à mesure de la descente. Au niveau de la tête de puits, un passage étanche (presse-étoupe) permet la sortie du câble et sa jonction aux tableaux de commandes.

Les recommandations particulières concernant ce matériel sont :

- d'utiliser des pompes adaptées fabriquées en alliage spéciaux ;
- d'assurer un bon centrage de la pompe dans la chambre de pompage au moyen de centreurs en matériaux inertes (téflon par exemple) fixés sur le corps de pompe ;
- d'utiliser une colonne d'exhaure en matériaux inertes ;
- de traiter le puits avec des bactéricides avant la mise en place du matériel.

4.3. CIRCUIT PRIMAIRE

Le circuit primaire de surface reliant la tête du puits de production à la tête du puits d'injection comprend les éléments suivants :

- des vannes de contrôles et de sectionnement ;
- éventuellement un ou plusieurs filtres en amont de l'échangeur ;
- l'échangeur permettant le transfert de la chaleur vers le circuit secondaire ;
- la pompe de réinjection ;
- une conduite (en acier revêtu, en fibre de verre, en matériau plastique armé) entourée par une gaine calorifuge isolante constitue le réseau de transfert qui relie ces différents éléments.

L'ensemble du matériel devra être défini de façon à n'avoir pas d'effet sur la qualité des eaux transitant dans le circuit. Un traitement bactéricide préalable à la mise en production (désinfection) devra être prévu.

4.4. POMPES À CHALEUR ET ÉCHANGEURS

L'échange thermique entre le fluide géothermal et le circuit de distribution de chaleur de fait au moyen d'un échangeur. Les pompes à chaleur (PAC) ne sont en contact avec le fluide géothermal qu'au travers de cet échangeur. Sauf accident impliquant l'endommagement de l'échangeur, il ne peut pas y avoir de mélange entre les fluides circulant dans le circuit primaire et ceux du circuit de distribution de chaleur.

Les échangeurs peuvent être de types différents : échangeurs multitubulaires, échangeurs spirales, échangeurs à plaques. Les meilleures performances sont obtenues avec les échangeurs à plaques. Ils peuvent être constitués en acier, en acier revêtu, en acier inoxydable ou en titane.

Les recommandations qui peuvent être faites concernant les échangeurs sont avant tout :

- l'utilisation de matériaux inaltérable vis-à-vis des eaux géothermales : acier inoxydable ou titane ;
- un suivi des paramètres d'entrée et de sortie de l'échangeur (pressions, températures) afin de s'assurer d'un fonctionnement nominal du matériel ;
- la mise en place de filtres en amont de l'échangeur afin d'éviter un endommagement par colmatage ;
- une procédure de nettoyage évitant la contamination du réseau ;
- une mise en sécurité du matériel vis-à-vis d'un endommagement externe qui pourrait conduire au mélange des eaux des deux circuits.

La sûreté des installations peut militer pour la mise en place d'un double échangeur bien qu'il ne soit pas rendu obligatoire lorsque les liquides caloporteurs et les lubrifiants utilisés dans les pompes à chaleur sont choisis parmi ceux autorisés par la réglementation sanitaire correspondante.

4.5. POMPES ET COLONNES DE RÉINJECTION

Après passage dans l'échangeur, l'eau géothermale passe dans une pompe de réinjection afin d'être refoulée dans l'aquifère exploité par le puits d'injection. Ces pompes, situées en surface, sont d'un accès facile pour la maintenance et l'entretien.

Une colonne de refoulement n'est installée dans le puits d'injection que dans la mesure où le forage n'est pas naturellement jaillissant. Dans ce cas, il n'y a pas de pression en tête de puits et le niveau statique de la nappe au repos est inférieur au niveau du sol. Pour éviter un rejet direct de l'eau dans le puits pouvant provoquer des désordres (chute de pression, aération, bullage, corrosion), il faut alors descendre une colonne de réinjection en dessous du niveau statique. Cette colonne sera maintenue suspendue dans la tête de puits.

Les recommandations particulières concernant ce matériel sont les mêmes que pour la pompe de production et la colonne d'exhaure :

- utiliser des pompes adaptées en alliage spéciaux ;
- utiliser une colonne de réinjection en matériaux inertes ;
- traiter le puits avec des bactéricides avant la mise en place du matériel.

5. Conditions d'exploitation et procédures de contrôles

5.1. MODES D'EXPLOITATION

Afin d'exploiter la ressource géothermique des nappes de l'Albien et du Néocomien **sans influencer quantitativement la ressource en eau**, il faut réinjecter l'eau géothermale dans la nappe après son passage dans les échangeurs.

Les avantages de cette méthode sont :

- de ne pas entamer la ressource en eau qui peut être réservée à d'autres usages ;
- d'éviter tout rejet en surface ;
- de maintenir constante la pression dans le réservoir tout au long de l'exploitation ;
- de ne provoquer que de faibles interactions entre puits permettant des opérations relativement proche les unes des autres.

Les inconvénients sont :

- l'obligation de réaliser des doublets de forage, entraînant un coût d'investissement plus important ;
- Lorsque les puits sont déviés, la difficulté technique et le coût que représente la forte inclinaison imposée par l'écartement souhaité entre les forages à cette profondeur ;
- un surcoût d'exploitation, entraîné par le fonctionnement de la pompe d'injection ;
- un réchauffement progressif de la nappe dans le cas d'une utilisation intensive pour la climatisation ;
- des risques sanitaires (chimiques et biologiques) à prendre en compte lors de la réalisation des ouvrages et pendant leur exploitation.

Lorsque l'eau géothermale est utilisée pour le chauffage des locaux, elle est rejetée dans le puits d'injection à une température inférieure de plusieurs degrés (ou plusieurs dizaines de degrés) par rapport à sa température initiale. Afin que cette eau ne refroidisse pas la ressource au niveau du puits de production, le point de réinjection est suffisamment éloigné du point de production. Cette distance est calculée de façon à conserver une température quasiment constante à la production durant 25 à 30 ans. Elle est généralement comprise entre 500 m (minimum) et 700 m.

Hormis cette contrainte, l'impact du refroidissement sur la qualité des eaux est limité aux modifications chimiques que pourraient entraîner les variations de pression et de température dans le circuit (voir le risque chimique développé plus avant).

Lorsque la ressource géothermale est utilisée pour la climatisation, l'eau est rejetée à une température supérieure à la température initiale. Dans cette configuration, l'impact envisagé sur la nappe peut être double, à la fois chimique et bactériologique. Outre les modifications chimiques dues aux variations de température et de pression, le réchauffement de la nappe peut en effet entraîner une prolifération de la population de bactéries naturellement présente dans les formations ou qui ont pu y être introduite par les travaux de forage.

Ce facteur devra être évalué dans la gestion de la nappe et pris en compte en tant qu'élément pouvant limiter l'exploitation de la ressource pour le refroidissement.

Un fonctionnement mixte pourrait être envisagé (chauffage l'hiver, climatisation l'été). La bulle chaude créée par la climatisation pendant l'été pourrait être refroidie par le soutirage calorifique du chauffage hivernal. On notera, toutefois, que ce mode d'exploitation n'évite pas la formation pendant une partie de l'année d'une bulle plus chaude pouvant être le siège d'une prolifération bactérienne. Il faudra donc être attentif à ce phénomène qui pourrait provoquer une pollution biologique, même localisée et saisonnière.

Il apparaît donc que, dans tous les cas, l'usage de la ressource pour la climatisation devra très être précisément évaluée en termes de réchauffement de la nappe et de ses conséquences sur une éventuelle prolifération bactérienne.

5.2. CONTRAINTES ET PRÉCAUTIONS DE FONCTIONNEMENT

Il a été vu précédemment que le maintien d'une parfaite étanchéité de l'ensemble du circuit primaire est une nécessité pour assurer la sécurité de l'installation. Cette étanchéité existe par construction dès lors qu'une bonne cimentation garantie l'étanchéité des tubages, en surface comme en profondeur, et que la construction du circuit primaire en surface a été menée à bien. Pour garantir le maintien de cette étanchéité, il faut éviter toute détérioration de la boucle primaire pendant l'exploitation et contrôler strictement l'ouverture de la boucle lors des maintenances :

- des protections adéquates devront être étudiées et mises en place pour se prémunir contre les risques externes naturels, technologiques ou anthropiques ;
- des moyens de contrôle du fonctionnement de la boucle devront être mis en place en vue d'éviter son endommagement ;
- enfin, des procédures strictes d'interventions devront être définies afin de réduire les risques de pollutions lors des opérations nécessitant l'ouverture des forages ou d'un élément du circuit primaire.

On évitera une détérioration accidentelle de la boucle en protégeant l'ensemble du circuit contre les agressions potentielles reconnues :

- en protégeant les têtes de puits et le circuit primaire : canalisation enterrée, construction permanente ou provisoire adaptées, évacuation des écoulements ;

- en réglementant les interventions sur la boucle quand un risque de pollution est attendu (inondation par exemple) ;
- en prenant les moyens de contrôler les accès aux sites.

La boucle doit être équipée des équipements permettant de détecter les anomalies de fonctionnement, avec pour objectif d'éviter un endommagement de la boucle primaire consécutif à un défaut :

- soit en déclenchant une alerte suffisamment tôt pour permettre une intervention des équipes techniques de la centrale ;
- soit en permettant un arrêt et une mise en sécurité immédiate et automatique des installations en cas de défaillance détectée.

Lors des interventions de maintenance ou d'entretien, il faudra :

- programmer l'ouverture des forages ou des éléments de la boucle de façon à ce que l'opération puisse se faire en limitant au minimum les risques externes (inondation, écoulements, ...) ;
- procéder au traitement bactéricide de tous les fluides injectés dans les forages (eau, saumure, etc.) ;
- réaliser systématiquement un traitement bactéricide de désinfection des éléments descendus ou installés dans la boucle. Ce traitement peut se faire :
 - soit directement par trempage dans les fluides du forage préalablement traitées,
 - soit par désinfection locale de l'élément installé,
 - soit par une désinfection de l'ensemble de la boucle avant sa remise en service.

5.3. MOYENS ET PROCÉDURES DE CONTRÔLES

5.3.1. Contrôle de fonctionnement

Des moyens de contrôle du fonctionnement de la boucle devront être mis en place en vue d'éviter son endommagement. Ces moyens peuvent être des dispositifs de mesure de quelques paramètres de la boucle en fonction du temps (avec un intervalle de scrutation à définir, mais suffisamment faible, par exemple de l'ordre de la minute).

La boucle doit être équipée des capteurs, robustes et sensibles, permettant de détecter les anomalies de fonctionnement, avec pour objectif d'éviter un endommagement de la boucle primaire consécutif à un défaut.

Les actions, basées sur le suivi par capteurs, seront de deux types :

- le déclenchement d'une alerte suffisamment tôt pour permettre une intervention des équipes techniques de la centrale ;
- l'arrêt et une mise en sécurité immédiate et automatique des installations en cas de défaillance constatée.

Les capteurs peuvent, par exemple, être :

- capteur de la température ambiante (de l'air extérieur) ;
- capteur de la température de l'eau de production ;
- capteur de la température de l'eau d'injection ;
- capteur du débit de production ;
- capteur de la pression d'exhaure ;
- capteur de la pression d'injection.

D'autres mesures en fonction du temps (avec un intervalle de scrutation à définir, mais suffisamment faible, par exemple de l'ordre de la minute) peuvent être :

- la consommation électrique de la pompe de production (permettant de calculer l'énergie fournie par la pompe de production) ;
- la consommation électrique de la pompe d'injection (permettant de calculer l'énergie fournie par la pompe d'injection).

Comme cela s'est vu dans le passé pour les installations géothermiques de basse enthalpie exploitant le Dogger du Bassin parisien, l'utilisation de ces mesures, pourrait être :

- rapide et immédiate, permettant de déclencher des alarmes et de mise en sécurité du système ;
- postérieure ou différée, pour exploiter les données fournies par les capteurs en vue d'une détection de phénomènes plus lents, comme :
 - le déclin de la température de production,
 - l'augmentation de la perte de charges dans les tubages, l'accroissement de la rugosité du tubage ou la présence de dépôts sur les parois du tubage d'injection, ou un colmatage partiel du réservoir ou toute autre anomalie.

Les données issues de ces capteurs peuvent également être utilisées pour de traitements statistiques ou de calculs énergétiques très utiles à l'exploitant et aux administrations.

5.3.2. Contrôle chimique et microbiologique (type, fréquence, ...)

L'eau est dans un état d'un équilibre fragile :

- un fluide acquiert sa composition chimique par échange (dissolution-cristallisation) avec les minéraux du réservoir et plus généralement avec tous les minéraux rencontrés depuis sa zone de recharge ;
- un équilibre thermodynamique s'instaure au niveau de l'aquifère entre le fluide et les formations réservoir ;
- l'exploitation par forage rompt cet équilibre.

Dans les forages les mécanismes de corrosion-dépôt peuvent être très complexes. Outre la minéralisation de l'eau, sa température, son pH, ses teneurs en ions chlorure, sulfate et carbonate, ayant une influence sur la corrosivité du milieu vis-à-vis des forages, c'est sa teneur en fer et en sulfure dissous et sa qualité bactériologique qui sont les paramètres les plus importants conditionnant la stabilité des forages.

Dans le but de prévoir et détecter les risques chimiques et microbiologiques dans le réservoir et la boucle géothermique exploitant l'aquifère du réservoir de l'Albien du Bassin parisien, il sera nécessaire de mettre en place des procédures et méthodes et une périodicité dans la mesure des paramètres permettant d'apprécier la qualité de l'eau et son éventuel évolution.

Ceci peut se réaliser par la mise en œuvre de plusieurs méthodes complémentaires.

Les méthodes géochimiques de mesure en tête ou dans le puits sont utilisées depuis très longtemps, comme outils de contrôle de problèmes d'exploitation.

Les outils géochimiques d'aide au diagnostic de dégradation des ouvrages sont adaptés parce que :

- les outils géochimiques reposent sur la recherche des perturbations subies par l'eau lors de sa remontée dans le forage et/ou sur les variations de ces perturbations en fonction du temps et du débit ;
- les mesures géochimiques sont réalisées en surface en cours d'exploitation avec des techniques d'analyse physico-chimiques classiques ;
- l'altération des caractéristiques physiques, chimiques, bactériennes ou isotopiques du fluide et donc du faciès géochimiques qui le caractérise, permet de déterminer l'origine de la dégradation et parfois de préciser si celle-ci est liée à l'ouvrage lui-même ou l'aquifère.

Dans les paragraphes précédents, nous avons passé en revue les principaux événements, qui peuvent se produire lors de l'exploitation d'un doublet géothermique et dans son réservoir (production et injection), qui mettent celui-ci dans une configuration hors des spécifications et qui justifient les méthodologies présentées ci-après et recommandées.

Les procédures et méthodes à mettre en œuvre sont communément utilisées pour le suivi physico-chimique du fluide, de la corrosion des tubages et de la perte de charge dans les tubages dans les centrales géothermiques. Ce sont les suivantes :

- les contrôles physico-chimiques et bactériologiques relatifs au fluide géothermal. On peut citer la minéralisation de l'eau, sa température, son potentiel redox, son pH, ses teneurs en ions chlorure, sulfate et carbonate, sa teneur en fer et en sulfure dissous et sa qualité bactériologique. Ces paramètres sont les plus importants conditionnant la stabilité du fluide et des forages ;
- le suivi par coupons de corrosion ;
- le suivi par mesures électrochimiques (sonde de corrosion) ;
- le suivi des pertes de charges dans les tubages.

Ces méthodologies ne sont probablement pas toutes utiles pour un suivi efficace, puisque nombreuses sont celles qui permettent d'accéder à la même information. Toutefois, il apparaît évident qu'il n'existe pas de méthode idéale, unique, universelle et peu coûteuse et que le recours à des méthodologies complémentaires permet d'apprécier l'état du fluide et de l'installation.

Ainsi, les périodicités des mesures, contrôles et analyses sont à justifier dans un cadre plus spécifique prenant en compte la prévision de problème au cas par cas et les aspects financiers et administratifs liés à la ressource et aux ouvrages. D'ores et déjà, et sans tomber dans l'excès, nous pouvons proposer une périodicité mensuelle.

5.4. MAINTENANCE DES PUITES

Recommandations générales :

- contrôle lors de l'ouverture du réseau primaire : une procédure d'ouverture du réseau primaire devra être mise en place. L'ouverture du réseau ne devrait être décidée que si aucun risque d'invasion par des éléments extérieurs (liquides en particuliers) n'est détecté et en prenant toutes les précautions nécessaires pour assurer la sécurité de l'opération ;
- procédures de désinfection : les procédures de désinfection doivent être systématiquement appliquées à la fin de chaque opération conduisant à ouvrir le réseau primaire (entretiens périodiques, interventions ponctuelles, descente de matériel) ;
- vérifications : l'état des filtres et des coupons de contrôles.

6. Conclusions

L'exploitation de la ressource géothermique des nappes de l'Albien et du Néocomien du Bassin parisien, tout en préservant quantitativement et qualitativement la ressource en eau, est envisageable moyennant certaines contraintes ou exigences à appliquer sur les opérations géothermiques concernées.

La contrainte principale exprimée par les autorités est l'obligation de réinjecter les eaux pompées dans la nappe où elle est prélevée : il s'agit à la fois de garantir la pérennité et la qualité de la ressource. Cette obligation impose pour les futurs projets :

- d'avoir la possibilité matérielle (espace) de réaliser le forage de production et le forage d'injection tout en respectant un écartement suffisant entre les puits ;
- de s'assurer de la capacité de ces formations captées à réabsorber les débits pompés pendant la durée de vie du projet ;
- de mettre en œuvre les moyens d'assurer la conservation de la qualité des eaux.

Il apparaît en effet délicat et coûteux de réaliser à partir d'une même plate-forme des forages suffisamment inclinés pour respecter l'écartement nécessaire au toit du réservoir. D'autre part, la réalisation de forages verticaux pourrait être préférée à celle de forages déviés, en particulier pour des raisons de qualité de construction et de facilité de maintenance. Pour réaliser un projet, il faudra donc pouvoir disposer de deux plates-formes à une distance suffisante pour respecter l'écartement nécessaire entre le forage d'injection et celui de production (entre 500 et 700 m selon les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe).

Les capacités de réinjection de la nappe de l'Albien (et plus encore de celle du Néocomien) sont très mal connues, qu'elles soient immédiates ou à long terme. La faisabilité et la pérennité des opérations vont en dépendre. Il apparaît donc important d'acquérir rapidement des connaissances suffisantes pour s'assurer de la faisabilité de la réinjection dans ces formations.

Garantir la conservation de la qualité des eaux implique un certain nombre de précautions à prendre lors de la réalisation des ouvrages et pendant leur exploitation. On s'assurera en particulier :

- de la mise en place d'un suivi général de l'évolution thermique et qualitative des nappes ;
- de la qualité de réalisation des forages et tout particulièrement ce qui concerne leur étanchéité : tubages, cimentation ;
- de la protection bactériologique de l'aquifère pendant la foration ;
- de la désinfection de l'ensemble la boucle avant sa mise en exploitation ;
- de la mise en place de moyens et procédures de protection contre les risques de pollutions externes identifiées sur le projet ;
- du suivi et du contrôle périodique de la boucle géothermale pendant son exploitation (paramètres physiques, chimiques et bactériologiques).

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

Objets		Recommandations
Risques sanitaires	Impacts thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Réaliser une modélisation thermique globale de la nappe - Mettre en place d'un réseau de suivi des évolutions thermiques sur le bassin - Contrôler l'impact des usages de la nappe pour la climatisation
	Risque chimiques	- Pas de recommandations particulières
	Risques biologiques	- Appliquer systématiquement les procédures de désinfection pendant la phase de forage du réservoir, lors de la mise en production et à chaque ouverture de la boucle
	Risques de pollutions externes	- S'assurer du contrôle de tous les accès à la boucle : interventions humaines, risques naturels, risques technologiques

Objets		Recommandations
Spécifications de la boucle	Réinjection	<ul style="list-style-type: none"> - Privilégier des forages verticaux - Acquérir au préalable une meilleure connaissance de la capacité de réinjection dans les nappes
	Surface	- Faire réaliser une étude détaillée de l'ensemble des contraintes de surface
	Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Tubages en acier de grade pétrolier de type K55 - Joints de tubage de type VAM - Crépines inox AISI 316 L de type fil enroulé - Fluides de forages non toxiques et protection bactéricide
	Procédures de réalisation	- Apporter une attention particulière aux procédures de réalisation des ouvrages, en particulier tout particulièrement en ce qui concerne la plateforme, les fluides de forage et le programme de cimentation
	Mise en production	- Se protéger de toute contamination chimique ou bactérienne (prévention et traitement)

Objets		Recommandations
Equipements de production	Têtes de puits	- À protéger des agressions externes
	Pompes et colonnes d'exhaure	- Pompes en alliages spéciaux - Colonne d'exhaure en matériaux inertes
	Circuit primaire	- Conçu de façon à ne pas avoir d'effet sur la qualité des eaux
	PAC et échangeurs	- Pas de contact entre le circuit PAC et le circuit géothermal - Echangeurs en matériaux inaltérables
	Pompes et colonnes de réinjection	- Pompes en alliages spéciaux - Colonne d'exhaure en matériaux inertes

Objets		Recommandations
Conditions d'exploitation et contrôles	Modes d'exploitation	- Réaliser un modèle de gestion de la ressource de la nappe - S'assurer de l'impact thermique des installations sur le réservoir, tout particulièrement lorsque de la climatisation est envisagée
	Contraintes et précautions de fonctionnement	- Protection de la boucle géothermale primaire - Détection des anomalies de fonctionnement - Appliquer les procédures de maintenance - Désinfection systématique après toute intervention sur la boucle
	Moyens et procédures de contrôles	- Capteurs de suivi du fonctionnement, d'alerte et de mise en sécurité - Suivi des paramètres de l'exploitation - Contrôles périodiques (chimie, microbiologie)
	Maintenance des puits	- Appliquer les procédures de contrôle et de désinfection lors de chaque ouverture du réseau - Désinfection systématique après toute intervention sur la boucle

7. Bibliographie

GEOCHALEUR (1987) – Étude sur l'utilisation de l'Albien à des fins géothermiques. Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie. Agence Financière de Bassin Seine-Normandie. Novembre 1987.

BRGM (1986) – Nappe de l'Albien en région Île-de-France. Utilisation simultanée des forages existants ou futurs pour l'alimentation en eau potable et la géothermie. Agence Financière de Bassin Seine-Normandie. Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du territoire et des Transports. Ministère de l'Industrie, des P et T et du Tourisme. Rapport 86 SGN 535 IDF. Octobre 1986.

BRGM (1981) – Étude hydrogéologique de la nappe de l'Albien en Région Île-de-France. Région Île-de-France. Ministère de l'Industrie. Rapport 81 SGN 800 IDF. Novembre 1981.

BRGM-département Géothermie (1983) – Géothermie de basse température (20 à 40 °C) en Île-de-France. Perspectives et contraintes de l'exploitation de l'aquifère géothermal de l'Albien. Avec la collaboration de Geotherma et d'autres unités du BRGM. Rapport n° 10/83/BEM.

Service Interdépartemental de l'Industrie et des Mines d'Île-de-France (1979) – Définition d'une gestion rationnelle de la nappe albienne. Février 1979.

Compagnie Française de Géothermie (1994) – État des lieux de l'exploitation du doublet à l'Albien, tours B16 & B20 du Front de Seine. Rapport 94 CFG 48. Décembre 1994.

Dere (1999) – La nappe de l'Albien. Acquisition de la charge minérale des eaux de l'aquifère : simulation des conditions d'altération de roches des affleurements albiens du Sud du Bassin parisien. Mémoire de Maîtrise des Sciences de la Terre à l'Université de Paris VI, 44 p.

Kloppmann W., Dever L., Edmunds W.M. (1998) – Residence time of Chalk groundwater in the Paris Basin and the North Gennan Basin: a geochemical approach, Applied Geochemistry. Vol. 13, 5. pp. 593-606.

BRGM – Prescriptions minimales et recommandations spécifiques aux forages géothermiques. Dogger du Bassin parisien. Groupe de travail « Forage » de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie.



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