



État de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques au Dogger

Rapport final

BRGM/RP-57245-FR
octobre 2009



Géosciences pour une Terre durable

brgm

État de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques au Dogger

Rapport final

BRGM/RP-57245-FR

octobre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007-GTH-07

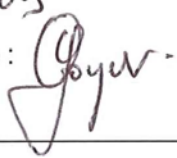
J.Y. Hervé

Vérificateur :

Nom : O.GOYENECHÉ

Date : 16/10/2009

Signature :



Approbateur :

Nom : A.DESPLAN

Date : 16/10/09

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.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Géothermie, Dogger, Forages.

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

Hervé J.Y. (2009) - État de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques exploitant le Dogger. Rapport d'avancement. BRGM/RP-57245-FR. 99 p., 7 fig.

Synthèse

Depuis la campagne géothermique des années 70-80 qui a vu la réalisation sur le territoire national de plus d'une centaine de forages profonds, aucun nouveau forage géothermique profond n'a été réalisé, à quelques exceptions près.

En près de 30 années, les matériels et les techniques ont évolué.

Les dernières réflexions collectives ont donné lieu à la rédaction de prescriptions et de recommandations (SAF-Environnement, Groupe de travail forage, « Prescriptions minimales et recommandations relatives aux forages géothermiques au Dogger dans le Bassin parisien », février 1985).

Ce dossier propose un état de l'art des forages géothermiques destinés à exploiter la nappe du Dogger du Bassin parisien, ainsi que les différents choix technico-économiques pouvant être envisagés pour concevoir et réaliser ces forages. Les différents choix contractuels ainsi que la couverture des risques de chantier seront analysés et présentés.

Ce document a été réalisé à la demande de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Il est destiné aux maîtres d'ouvrages et aux bureaux d'études qui les accompagnent dans leurs projets géothermiques.

Les contraintes techniques, ainsi que l'expérience acquise lors des opérations déjà réalisées dans le Bassin parisien, sont analysées. Les différentes solutions envisageables, leurs avantages, leurs inconvénients et les conséquences financières correspondantes sont discutés pour chacun des éléments constitutifs des ouvrages.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Analyse des contraintes de forage	11
2.1. LA PROFONDEUR ET L'ESPACEMENT DES OUVRAGES	11
2.2. L'ENVIRONNEMENT DES CHANTIERS.....	12
2.3. LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION	14
3. Spécifications des machines de forage	15
3.1. LE PERSONNEL.....	16
3.2. PRÉPARATION DE LA PLATEFORME.....	17
3.3. L'AMENÉE ET LE REPLI DU MATÉRIEL.....	18
3.4. LE MÂT DE FORAGE	18
3.5. LE MATÉRIEL DE LEVAGE ET DE ROTATION	19
3.6. LES SOURCES D'ÉNERGIE	20
3.7. LES POMPES À BOUE ET LES ÉQUIPEMENTS DE BOUE.....	20
3.8. LES ÉQUIPEMENTS DE TÊTE DE PUITS ET DE SÉCURITÉ.....	21
3.9. LA MESURE DES PARAMÈTRES DE FORATION.....	22
3.10. LE TRAIN DE SONDE	23
3.11. LES MOYENS D'INSTRUMENTATIONS.....	24
3.12. LES MOYENS DE TUBAGE ET DE CIMENTATION.....	24
3.13. LES ÉQUIPEMENTS DE CHANTIER	25
3.14. LE MATÉRIEL DE MISE EN PRODUCTION.....	26
4. Critères de choix des diamètres de tubage	27
4.1. CRITÈRES GÉNÉRAUX	27
4.2. LES PERTES DE CHARGE.....	28
4.3. LA CHAMBRE DE POMPAGE.....	30
4.4. ÉLÉMENTS DE CHOIX ENTRE TUBAGES DE PRODUCTION 7" ET 9"5/8	31
4.5. AUTRES POSSIBILITÉS	33
4.6. PROPOSITION DE PROGRAMMES DE TUBAGE	33
4.6.1. Tubage de production acier 7" (double tubage)	34

4.6.2.	Tubage de production acier 9"5/8 (double tubage)	34
4.6.3.	Tubage de production acier 9"5/8 (simple tubage)	35
4.6.4.	Tubage technique 13"3/8 et colonne de production composite 9"5/8 amovible.....	35
5.	Critères de choix des matériaux de cuvelage	37
5.1.	LES TUBAGES EN ACIER API	37
5.2.	LES TUBAGES EN ACIERS SPÉCIAUX	39
5.3.	LES TUBAGES EN ACIER REVÊTU	40
5.4.	LES TUBAGES EN MATÉRIAUX COMPOSITES	40
5.5.	LES JOINTS DE TUBAGE	43
5.6.	CONCLUSION SUR LE CHOIX DES MATÉRIAUX DE TUBAGE	44
6.	Comparatif des programmes de forage envisageables	47
6.1.	FORAGES VERTICAUX OU FORAGES DÉVIÉS	47
6.1.1.	Réalisation de forages verticaux	47
6.1.2.	Réalisation de forages déviés	48
6.2.	TUBAGES DE PRODUCTION EN 7" OU 9"5/8.....	48
6.3.	TUBAGES EN ACIER OU TUBAGES COMPOSITES	49
6.4.	TUBINGS DE PRODUCTION AMOVIBLES OU CUVELAGES FIXES	50
7.	La cimentation des tubages.....	53
7.1.	OBJECTIFS ET CONTRAINTES.....	53
7.2.	ANALYSE DES CIMENTATIONS RÉALISÉES.....	55
7.3.	CHOIX DES LAITIERS DE CIMENT	55
7.4.	LES DIFFÉRENTES PROCÉDURES DE CIMENTATION	57
7.5.	LE MATÉRIEL DE CIMENTATION.....	58
7.6.	LE MATÉRIEL DE CENTRAGE	59
7.7.	VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ DES CIMENTATIONS	60
7.8.	REMÉDIATIONS	61
8.	Essais de puits.....	63
8.1.	OBJECTIFS	63
8.2.	QUELQUES DÉFINITIONS	64
8.3.	LES ESSAIS DE FORMATION	64
8.3.1.	Objectifs des essais de formation	65
8.3.2.	Principe	65

8.3.3.	Données nécessaires à l'interprétation d'un test.....	66
8.3.4.	Les différents essais de formation.....	67
8.3.5.	Durée d'un essai de formation.....	68
8.4.	LES ESSAIS PAR PALIERS OU ESSAIS DE PRODUCTIVITÉ ET D'INJECTIVITÉ	69
8.4.1.	Objectifs.....	69
8.4.2.	Principe.....	69
8.4.3.	Équipements et acquisition des données	70
8.5.	STIMULATIONS DU RÉSERVOIR	72
9.	Têtes de puits	73
9.1.	GÉNÉRALITÉS	73
9.2.	TÊTE DE Puits DE PRODUCTION	73
9.3.	TÊTE DE Puits D'INJECTION	75
10.	Mesures et contrôles en forage	77
10.1.	PARAMÈTRES DE FORAGE	77
10.2.	DIAGRAPHIES INSTANTANÉES	78
10.3.	DIAGRAPHIES DIFFERÉES.....	79
10.4.	ÉVOLUTION ET PERSPECTIVES	79
11.	Options de réhabilitation	81
11.1.	LE DIAGNOSTIC	81
11.2.	LE CURAGE	82
11.3.	LE RECHEMISAGE	83
11.4.	L'ABANDON DES Puits.....	83
11.5.	DOUBLET OU TRIPLET	84
12.	Ingénierie de forage	87
12.1.	LA PRÉPARATION D'UN PROJET GÉOTHERMIQUE.....	87
12.1.1.	L'assistance à la maîtrise d'ouvrage.....	88
12.1.2.	Les contrats d'études	88
12.2.	LES CONTRATS DE RÉALISATION.....	89
12.2.1.	Le contrat de maîtrise d'œuvres.....	89
12.2.2.	Le contrat de supervision de forage	89
12.2.3.	Les contrats de suivi des installations	90
12.3.	LES CONTRATS DE FORAGE AU FORFAIT	90
12.3.1.	Description.....	90

12.3.2. Conditions d'application	90
12.3.3. Position de la maîtrise d'ouvrage	91
12.3.4. Position du titulaire du marché de forage.....	91
12.3.5. Gestion des aléas de chantier.....	92
12.4. LES CONTRATS DE FORAGE EN RÉGIE CONTRÔLÉE	92
12.4.1. Description	92
12.4.2. Conditions d'application	92
12.4.3. Position de la maîtrise d'ouvrage	93
12.4.4. Position du titulaire du marché de forage.....	93
12.4.5. Responsabilité du maître d'œuvre	93
12.4.6. Gestion des aléas de chantier.....	94
12.5. LA COUVERTURE DES RISQUES.....	94
12.6. ÉVALUATION DES COÛTS	94
12.6.1. Du devis au coût de réalisation	94
12.6.2. Le coût final pour le maître d'ouvrage.....	96
12.7. RÉCAPITULATIF	97
13. Conclusions	99

Liste des figures

Figure 1 - Superposition des données et des modèles simulés (ici, pression et dérivé de pression vs log du temps, logiciel Saphir, Kappa engineering).....	66
Figure 2 - Évolution de la pression au puits lors d'un essai de production et de remontée de pression.	67
Figure 3 - Profil de pression au sein d'un aquifère et rayon d'investigation, P_i , pression initial, R_i , rayon d'investigation, Q , débit.....	68
Figure 4 - Essais par paliers et courbes caractéristiques.	70
Figure 5 - Schéma simplifié de l'organisation d'un projet de géothermie.	87
Figure 6 - Coût d'une opération au forfait.	96
Figure 7 - Visualisation du coût d'une opération en régie.....	97

1. Introduction

Depuis la campagne géothermique des années 70-80 qui a vu la réalisation sur le territoire national de plus d'une centaine de forages profonds, aucun nouveau forage géothermique profond n'a été réalisé, à quelques exceptions près.

En près de 30 années, matériels et techniques ont évolué, la réglementation concernant le sous-sol en Île-de-France également.

Les dernières réflexions collectives ayant donné lieu à la rédaction de prescriptions et de recommandations datent de 1985 (SAF-Environnement, Groupe de travail forage, « Prescriptions minimales et recommandations relatives aux forages géothermiques au Dogger dans le Bassin parisien », février 1985).

L'objectif de ce rapport est de proposer un nouvel état de l'art pour la réalisation des ouvrages géothermiques souterrains exploitant la nappe du Dogger du Bassin parisien : les forages, les matériaux mis en œuvre dans la boucle géothermale, les différents choix technico-économiques pouvant être envisagés pour concevoir et réaliser ces forages. Les différents choix contractuels ainsi que la couverture des risques de chantier seront également analysés et présentés.

Ce document a été réalisé à la demande de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) dans le cadre des travaux du Centre Technique d'appui aux professionnels de la géothermie, dans le but d'actualiser les connaissances et les pratiques de réalisation des forages profonds en géothermie Basse-Energie. Il est destiné aux maîtres d'ouvrages et aux bureaux d'études qui les accompagnent dans leurs projets géothermiques. Il vise à donner des éléments d'informations pertinents pour la réalisation en sécurité d'ouvrages pérennes adaptés aux besoins, au meilleur coût.

Il constitue une première étape d'une série de rapports à paraître, dédiés à faire un état des techniques utilisées dans l'élaboration et la gestion d'une opération de géothermie parmi lesquelles on peut citer : « les conditions de réalisation et de contrôle des cimentations allégées », « le suivi, l'entretien et la maintenance de la boucle géothermale », « les conditions de réhabilitation et d'abandon des forages ».

2. Analyse des contraintes de forage

La réalisation de forages au Dogger dans le Bassin parisien impose différentes contraintes dont on analysera les principales incidences dans ce premier chapitre.

Un des éléments les plus contraignants est l'installation, dans un milieu urbain à forte densité de population, d'un chantier nécessitant la mise en œuvre de moyens lourds. Les répercussions en sont nombreuses et parfois coûteuses.

Mais les contraintes générales liées au respect de l'environnement et de la législation afférente, ainsi que celles qui apparaîtront ultérieurement lors de l'exploitation des sites géothermiques, doivent également être évaluées et prises en compte dans le projet.

2.1. LA PROFONDEUR ET L'ESPACEMENT DES OUVRAGES

Réaliser des forages, pour atteindre l'aquifère du Dogger à une profondeur verticale de 1 600 à 1 800 m, impose l'utilisation de moyens lourds de type pétrolier. D'autre part, un projet géothermique au Dogger oblige, pour des raisons environnementales, à réaliser un couple de forages (doublet) production-réinjection, avec un espacement entre les deux puits au toit du réservoir de l'ordre de 1 000 à 1 200 m. La distance exacte est calculée en fonction des paramètres hydrodynamiques du Dogger au lieu considéré, des conditions d'exploitation prévues par le projet et du temps de percée de la bulle froide (en ce qui concerne ce dernier point, on considère généralement comme acceptable une diminution de 1 °C au puits de production au bout de 30 ans d'exploitation). L'implantation des ouvrages doit également tenir compte des installations voisines préexistantes, exploitant le même aquifère, qui risquent d'être affectées, ce qui peut conduire à augmenter la distance entre les puits au-delà des besoins purement hydrodynamiques et thermiques.

Pour réaliser de tels ouvrages, il faut pouvoir disposer d'un chantier d'une surface de l'ordre de 7 000 m² ou plus (5 000 m² est un strict minimum, souvent problématique et généralement coûteux à gérer). En région parisienne, la très faible disponibilité foncière limite le choix de terrains utilisables et peut parfois rendre impossible la réalisation des ouvrages.

Il est tout à fait envisageable, et fréquent, de réaliser le doublet de forages (puits de production et puits de réinjection) à partir d'une même plateforme. Dans un tel cas, les puits, espacés d'une dizaine de mètres en surface, sont déviés de façon à obtenir la distance nécessaire au toit du réservoir. Cette solution comporte des avantages et des inconvénients.

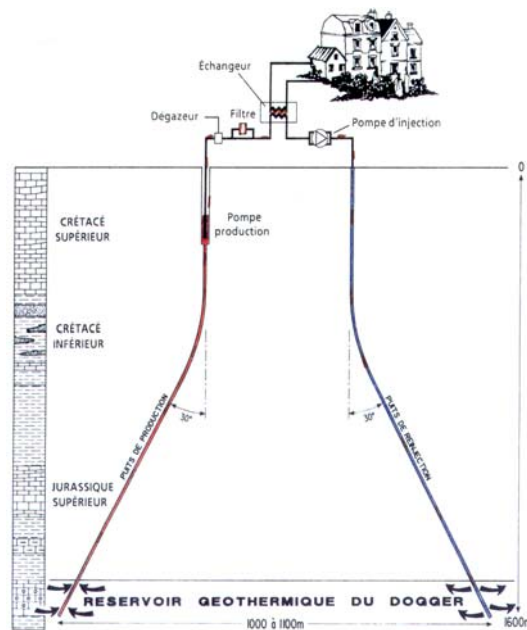
Avantages :

- Implantation d'une seule plateforme au lieu de deux ;

- Longueur de réseau primaire (réseau d'eau géothermale) entre les têtes de puits réduite au minimum.

Inconvénients :

- Surcoût de travaux non négligeable (25-30 %) pour réaliser les puits en déviation. Ce surcoût est principalement dû à la mise en œuvre de la technologie (matériel, personnel, temps) et à l'augmentation du métrage foré et de la longueur des tubages ;
- Augmentation des risques en forage du fait de la déviation.



2.2. L'ENVIRONNEMENT DES CHANTIERS

La réalisation de travaux miniers (ici le chantier de forage) doit respecter le règlement général des industries extractives (RGIE), le Code minier et les prescriptions de l'arrêté préfectoral autorisant les travaux qui en découlent.

L'environnement urbain a une incidence directe sur la façon de gérer un chantier de forage en région parisienne et certains coûts peuvent en être majorés. Les principaux éléments à prendre en compte sont les suivants :

- **Accès** : une partie du matériel de forage est constitué de colis hors-gabarit (encombrement et parfois poids) dont il faudra assurer l'amenée et le repli par camions en milieu urbain. D'autre part, le chantier nécessite un accès permanent (24h/24) aux poids lourds et aux véhicules légers. L'accès est donc un paramètre important qui peut déterminer le choix définitif de la localisation des ouvrages et impacter fortement les coûts. À titre d'exemple, la réalisation du forage

géothermique à la Réunion avait imposé la reconstruction complète d'un pont enjambant la rivière du Mat.

- **Sécurité et information** : en milieu urbain, outre les sécurités actives et passives propres à des chantiers de forage profonds de type pétrolier, la sécurité des chantiers doit non seulement prendre en compte le fonctionnement du chantier lui-même mais intégrer les risques vis-à-vis de son environnement : bâtiments et immeubles d'habitations proches, circulation autour du chantier, information du public, visites inévitables et nécessaires des installations. La protection et l'information des riverains imposent des mesures spécifiques assez contraignantes en termes de moyens, de disponibilité et d'affichage de l'information.

Le chantier peut également avoir à tenir compte des contraintes externes diverses : réseaux enterrés (eau, électricité, gaz, voirie, téléphonie), tunnels de métro, anciennes carrières ou excavation, lignes électriques, couloirs de navigation aérienne... La liste peut être longue et montre toute l'importance de l'étude d'impact préliminaire.

Les coûts des dispositifs à mettre en place doivent être évalués en tenant compte de ces contraintes et des besoins exprimés par le maître d'ouvrage et par les autorités compétentes.

- **Bruit** : un chantier de forage fonctionne en permanence (24 heures sur 24 et 7 jours sur 7). Si, dans l'ensemble, le niveau de bruit reste moyen et acceptable réglementairement, on constate qu'il peut parfois apparaître lancinant pour le voisinage. D'autre part, certaines opérations spécifiques (cimentation, stimulation...) peuvent se montrer ponctuellement bruyantes. Le fait de travailler en milieu urbain, en proximité d'immeubles d'habitations, est une contrainte forte qu'il faut prendre en compte dans l'organisation du chantier dès sa préparation. Le matériel utilisé peut être choisi en fonction des critères de bruit (machine de forage électrique ou diesel-électrique) ou plus ou moins modifié pour répondre aux exigences de l'environnement (capitonnage, amélioration des échappements). Le chantier lui-même peut être conçu pour réduire les bruits (murs anti-bruits, alertes visuelles remplaçant certaines alertes sonores, etc.). Enfin, les opérations spécifiquement bruyantes seront autant que possible planifiées pour éviter les périodes les plus sensibles (nuits, jours fériés).
- **Rejets** : les produits issus de l'activité de forage (gaz d'échappement des moteurs thermiques, graisses et produits lubrifiants, fluides et déblais de forage, eaux de lavage et des essais de puits, dégagements d'H₂S des eaux géothermales) subissent différents traitements pour éviter ou limiter autant que possible les nuisances et les pollutions. Différents moyens sont utilisés :
 - filtres et produits absorbants ;
 - goulottes de récupération et bacs de décantation pour les hydrocarbures ;
 - traitement sur le site ou hors du site pour les boues et déblais, mise en décharge agréée des résidus solides ;
 - refroidissement et traitement avant rejet, citernage ou réinjection dans un des puits pour les eaux d'essais.

Tout rejet dans un réseau doit être encadré par une convention passée entre le maître d'ouvrage et le gestionnaire du réseau.

2.3. LES CONTRAINTES D'EXPLOITATION

L'exploitation d'une opération de géothermie au Dogger doit respecter le règlement général des industries extractives (RGIE), le Code minier et les prescriptions de l'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation du gîte qui en découlent.

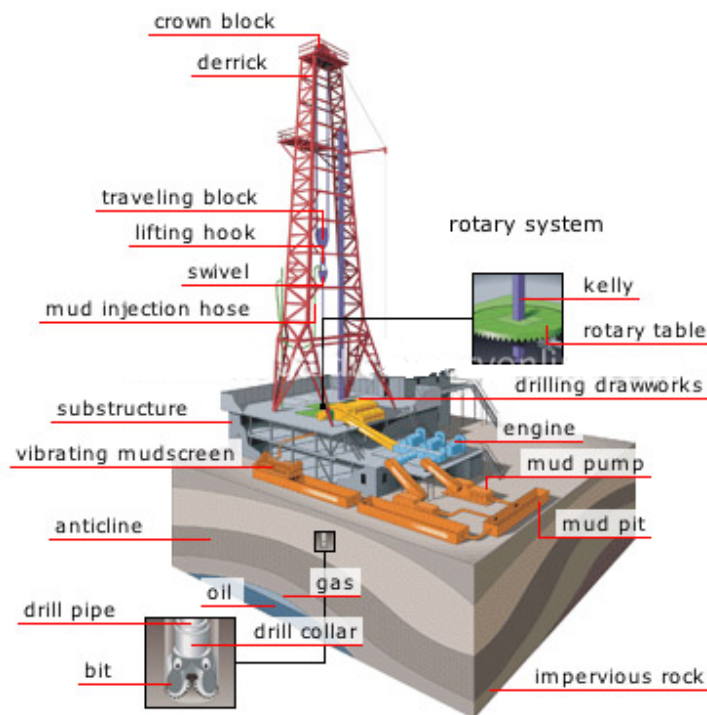
Les principales contraintes que l'on peut rencontrer au cours de l'exploitation des ressources géothermiques du Dogger sont de deux types :

- les **contraintes de surface** : pendant la durée de vie des ouvrages, il s'agit de conserver un accès et un espace suffisant autour des têtes de puits pour permettre les opérations de maintenance et d'entretien des pompes d'exhaure, des forages et, en fin de vie des ouvrages, pour procéder aux travaux d'abandon. Il est conseillé de conserver libre autant que possible la surface initiale de la plateforme. Toutefois, celle-ci peut être réduite en cas de nécessité, mais en conservant un espace suffisant pour permettre la mise en place d'une unité de servicing pour les opérations d'entretien et d'abandon (3 000-4 000 m²) ;
- les **contraintes liées aux fluides exploités** : les débits exploités atteignent ou dépassent les 300 m³/h et peuvent atteindre 400 m³/h. Les pressions en tête de puits sont parfois importantes (jusqu'à 10 bars en pression statique, 70 bars et parfois plus à l'injection). D'autre part, les eaux du Dogger sont salées et agressives. La corrosion des matériaux constituant les forages et la boucle primaire peut être rapide si aucun moyen de prévention n'est mis en œuvre. Actuellement, le traitement des puits avec des produits inhibiteurs de corrosion adaptés permet :
 - de réduire d'un facteur 10 la vitesse de corrosion observée,
 - de conserver un état de surface acceptable dans les colonnes de production en limitant le développement des sulfures de fer.

3. Spécifications des machines de forage

L'entreprise de forage met à la disposition du maître d'ouvrage et/ou du maître d'œuvre un ensemble de matériels et d'équipements dont les caractéristiques doivent permettre de mener à bonne fin les opérations de forage d'un doublet géothermique au Dogger. Les matériels mis à disposition doivent être conformes au Règlement Général des Industries Extractives (RGIE) en particulier au titre « forages ». Les prestations de l'entreprise incluent le transport du matériel jusqu'au(x) site(s), la réalisation des puits, leur mise en production, le repli de l'ensemble du matériel en fin de chantier à réception des ouvrages.

Elle doit fournir le personnel spécialisé nécessaire en nombre suffisant pour permettre le fonctionnement de ce matériel 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.



Les appareils de forage et leurs équipements annexes comportent de nombreux éléments qui seront décrits ci-après, en particulier :

- le mât de forage ;
- les équipements de levage et de rotation ;
- les sources d'énergie ;
- les pompes à boue et les équipements de boue ;

- les équipements de tête de puits et de sécurité ;
- les équipements de mesure des paramètres de foration ;
- le train de sonde ;
- les moyens d'instrumentation ;
- les moyens de tubage et de cimentation ;
- les équipements de chantier (barraquements, sécurité, véhicules) ;
- le matériel de mise en production.

3.1. LE PERSONNEL

Le personnel de chantier doit avoir les compétences requises et l'expérience suffisante pour faire fonctionner l'ensemble du matériel et réaliser le programme de forage proposé. On s'assurera en particulier qu'il a une expérience suffisante des chantiers de ce type et du matériel qu'il doit utiliser. Le personnel doit avoir reçu une formation en matière de sécurité et de santé au travail. Le personnel a pour tâche :

- de mener à bonne fin les travaux de forage proprement dit jusqu'à la réception des ouvrages ;
- de maintenir l'ensemble du matériel en bon état de fonctionnement pendant la durée du chantier ;
- d'observer, de respecter et de faire respecter l'ensemble des consignes de sécurité applicables sur un chantier de forage ;
- d'assurer l'entretien du chantier (propreté, rangement, sécurité) ;
- de répondre aux besoins éventuels du maître d'ouvrage (visites de site, manutention, transport de matériel ou actions particulières comme la participation aux audits ou contrôles extérieurs).

La composition d'une équipe dépend du type de machine. Elle est au minimum :

- hors poste : un chef de chantier, un mécanicien, trois manœuvres ;
- par poste : un chef de poste, un second, deux ou trois manœuvres.

Le personnel d'encadrement du chantier doit avoir suivi une formation sur la maîtrise des éruptions, dispensée par un organisme habilité et donnant lieu à la délivrance d'un certificat dont la validité est au plus de deux ans. Au moins un titulaire d'un brevet de secourisme est présent sur chaque chantier de forage ou d'intervention pendant toutes les périodes d'activité.

Dans le cas d'entreprises étrangères (européennes ou non), il faut s'assurer, sauf dérogations particulières obtenues des autorités compétentes, que la législation du travail français soit appliquée par l'entreprise sur le chantier (RGIE et Code du travail), en particulier :

- le fonctionnement des équipes en postes de travail de 3 x 8 heures avec 1 jour de repos par semaine (la réglementation française ne permet pas un fonctionnement en poste de 2 x 12 heures même si certains pays l'autorisent) ;
- les règles d'hygiène et la sécurité appliquées aux travailleurs (vestiaires, douches, etc.) ;
- les règles de sécurité appliquées au chantier et au matériel (normes, agréments).

Le français doit être compris par toutes les personnes remplissant une fonction intéressant la sécurité générale, et parlé par les chefs de chantier.

3.2. PRÉPARATION DE LA PLATEFORME

Les tous premiers travaux réalisés consistent à préparer la plateforme (environ 5 000 m²) qui recevra la machine de forage, ses annexes et l'ensemble des installations nécessaires à la réalisation des ouvrages. Il s'agit principalement de travaux de génie civil. Les points importants de ces travaux concernent :

- le choix du site et la maîtrise foncière des terrains ;
- les moyens d'accès et l'organisation des installations sur les surfaces disponibles, ainsi que la définition des périmètres de sécurité ;
- l'étude géotechnique déterminant la préparation et le traitement des terrains, afin que ceux-ci puissent résister aux contraintes mécaniques attendues (machine de forage, aires de roulement, aires de stockage, bassins) ;
- la dalle de béton supportant la machine de forage, incluant les caves et les caniveaux ;
- les bassins de stockage des fluides de forage et des eaux d'essais ;
- les ancrages du mât de la machine (lorsque celle-ci ne dispose pas d'un mât auto-porteur) ;
- la réalisation par une machine spécialisée de l'avant-puits en gros diamètre (profondeur variable selon les sites, fonction des terrains de surface attendus) ;
- la mise en place d'un point d'eau (débit 50 à 100 m³/h) et si nécessaire l'amenée de l'électricité et du téléphone sur le site ;
- l'installation d'une clôture réglementaire délimitant le chantier ;
- la mise en place des panneaux obligatoires de chantier et des éventuels panneaux informatifs.

À la fin des travaux de foration, en fonction des besoins, cette plateforme pourra être remise dans son état initial. Il faudra toutefois garder la possibilité d'intervenir sur les puits avec une machine de servicing pour réaliser des mesures, des interventions de maintenance ou d'entretien. Cela implique de conserver un environnement adapté autour des têtes de puits :

- dalle et caves avec accès sécurisé et système de pompage (vide-cave) ;

- accès possible poids-lourds ;
- périmètre de sécurité autour des têtes de puits (20 m) ;
- surface libre disponible pour les interventions (environ 1 000 m²) ;
- éventuellement, accès proche possible à l'eau et à l'électricité.

3.3. L'AMENÉE ET LE REPLI DU MATÉRIEL

Le maître d'ouvrage devra s'assurer de la faisabilité de l'accès du matériel jusqu'au site envisagé (largeur des voies, réseaux aériens, passages de ponts ou souterrains). Il vérifiera en particulier la compatibilité des ouvrages d'art qu'il faudra éventuellement franchir avec le matériel le plus lourd et/ou le plus encombrant.

L'amenée jusqu'au lieu de forage, les ripages ou déplacements entre sites de forages et le repli du matériel sont à la charge de l'entreprise de forage qui s'assurera des moyens de transport et des autorisations afférentes pour le transit de convois exceptionnels. D'autre part, il est recommandé dans de nombreux cas d'établir au préalable un plan de circulation en accord avec les autorités concernées (voirie, équipement, préfecture). Ce plan est applicable pendant la durée du chantier.

À l'issue des travaux, l'entreprise de forage devra laisser le site dans un état de propreté acceptable, sans déchets ou matériel résiduel d'aucune sorte. Les caniveaux devront être curés et la cave de tête de puits vidée, nettoyée et protégée.

La remise en état définitive du site (réhabilitation du site) est à la charge du maître de l'ouvrage, sauf disposition contractuelle spécifique.

3.4. LE MÂT DE FORAGE

La capacité du mât d'une machine de forage doit remplir une double condition :

- d'une part, être capable de supporter le poids maximum de la garniture la plus lourde, augmenté d'un coefficient de 30 % pour tenir compte des frottements en puits dévié ;
- d'autre part, être supérieure au poids dans l'air du plus lourd tubage à descendre dans le forage.

La plus forte de ces deux valeurs, majorée d'un coefficient de sécurité de 30 %, donne la capacité exigée du mât.

Exemple : pour un programme avec tubage de production 9"5/8 descendu à 1 800 m de profondeur. On dispose de tiges de forage de 5" (19,5 lb/ft G105 premium) ayant une limite élastique de tension de 194 tonnes. Il convient de ne jamais dépasser 80 % de cette capacité, soit 155 tonnes.

Le poids maximal de la garniture en cours de foration dans une boue de densité 1,1 est de 95 tonnes (37,7 tonnes de masse-tiges, plus 53,1 tonnes de tiges, plus 4 tonnes de

moufflage) auquel on rajoutera 30 % pour la déviation, puis à nouveau 30 % de coefficient de sécurité, soit un total de 160 tonnes.

Le poids dans l'air du tubage 9"5/8 40 lb/ft est de 104,4 tonnes, auquel il faut rajouter environ 4 tonnes de moufle, soit 108,4 tonnes. En rajoutant le coefficient de sécurité de 30 %, on atteint 141 tonnes.

C'est la garniture de forage qui représente la plus forte valeur. On considérera qu'un mât d'au-moins 160 tonnes de capacité dynamique pourra convenir pour assurer un tel programme.

Le **haubanage du mât** doit être mis en place de façon à répondre aux diverses sollicitations de ce dernier. Il est donc important que l'implantation de la plateforme de forage permette un positionnement correct de l'ancrage des haubans et que ces ancrages puissent résister aux efforts mécaniques. Chaque machine dispose d'un schéma d'ancrage optimum. Ce schéma peut éventuellement subir des modifications, mais au prix d'une perte (à connaître) de la capacité du mât.

Il est à noter que certaines machines disposent de mât autoporteur (sans haubanage, ou avec haubanage facultatif).

La **hauteur du mât** est une contrainte à prendre en compte en termes de sécurité. Dans le cas du Dogger du Bassin parisien, cette hauteur est généralement comprise entre 35 et 53 m. La distance entre la tour de forage et des éléments extérieurs au chantier (immeuble d'habitation par exemple) doit être supérieure à la hauteur du mât. Des dispositions particulières devront être prises dans le cas contraire. D'autre part, la signalisation de la tour doit être déclarée au Service du Contrôle Aérien des Aéroports de la région concernée.

3.5. LE MATÉRIEL DE LEVAGE ET DE ROTATION

La puissance du treuil de levage disponible à l'entrée du treuil principal doit permettre le levage du matériel le plus lourd qu'il faudra manœuvrer avec une vitesse de 0,5 m/s (recommandation du Comité des Techniciens de la Chambre Syndicale du Pétrole).

Outre le treuil principal, le matériel de levage comporte :

- un treuil de curage avec un câble de 9/16" ou 5/8", d'une longueur compatible avec la profondeur maximum des forages (3 000 m) ;
- deux cabestans de blocage et de déblocage ;
- un frein auxiliaire ;
- un moufle compatible avec l'ensemble du matériel (mât et puissance).

Le matériel de rotation comporte une table de rotation et son entraînement également compatible avec l'ensemble du matériel demandé.

Sur les chantiers actuels, on constate une utilisation de plus en plus fréquente d'une tête de forage rotative motorisée. Dans le cas de forage dévié en gros diamètre, ce matériel donne en effet une plus grande souplesse de fonctionnement et permet de réduire les risques de coincement. Son usage ou non doit intégrer l'expérience des opérateurs.

3.6. LES SOURCES D'ÉNERGIE

Les sources d'énergie nécessaires au fonctionnement du chantier (levage, rotation, pompage, électricité) doivent avoir une puissance compatible avec les besoins des matériels installés. Elles peuvent être d'origine diverses :

- moteurs diesels indépendants pour les différents besoins ;
- moteur diesel pour les organes principaux et branchement externe pour l'alimentation électrique ;
- alimentation diesel-électrique autonome de l'ensemble du chantier ;
- alimentation électrique externe pour l'ensemble du chantier.

En milieu urbain, les deux dernières sources d'énergie sont à privilégier pour des raisons environnementales (bruit, pollution). Les machines de forage modernes sont assez souvent équipées en « diesel-électrique ». Il est par contre très rare de pouvoir disposer d'une source d'alimentation électrique externe de puissance suffisante à proximité des chantiers.

Les cuves de stockage d'hydrocarbures devront impérativement être placées dans des bacs de rétention étanches et de capacité au moins égale à celle des cuves entreposées. Cette prescription s'applique à tous les types de cuve, y compris celles à double paroi.

3.7. LES POMPES À BOUE ET LES ÉQUIPEMENTS DE BOUE

La machine de forage doit être équipée de deux pompes à boue, de caractéristiques si possible identiques ou voisines. Ces pompes doivent pouvoir assurer un débit effectif de 2 200 l/mn sous 130 bars, et de 1 500 l/mn sous 200 bars. Les fluides d'arrosage des tiges de pistons sont récupérés.

La chaîne de traitement des fluides de forage doit comprendre :

- des tamis vibrants doubles ou mieux encore « linéar motion » ;

en l'absence de ces derniers :

- un groupe dessableur ;
- un groupe dessilteur ou un « mud-cleaner » (ensemble d'hydrocyclone et de tamis fins traitant mécaniquement la boue) ;
- le volume de la sablière sera de 5 à 10 m³ et comportera une vidange rapide ;

- les bacs à boue devront avoir un dispositif de by-pass et seront agencés de façon à avoir :
 - une capacité active de 30 m³,
 - une capacité de réserve de 60 m³,
 - une capacité de fabrication de 30 m³ ;
- la réserve d'eau devra être de 50 m³ (nota : quand un bassin d'essais existe, il est parfois possible de l'utiliser comme réserve d'eau).

Une pompe vide-cave, capable d'absorber jusqu'à 100 m³/h en toutes conditions (fluides de forages, fluides chargés de débris, eau chaude), devra être maintenu disponible pour vidanger autant que de besoin la cave de forage de tous liquides ayant pu y pénétrer.

Le traitement des boues doit permettre une évacuation des déblais de forage respectant la législation et les prescriptions de l'arrêté préfectoral autorisant les travaux. Plusieurs solutions sont envisageables :

- évacuation par camions-citernes et traitement à l'extérieur du site ;
- pré-traitement sur le site et évacuation des parties liquides et solides ;
- traitement complet sur le site avec solidification des boues.

Tout rejet dans un réseau doit être encadré par une convention passée entre le maître d'ouvrage et le gestionnaire du réseau.

3.8. LES ÉQUIPEMENTS DE TÊTE DE Puits ET DE SÉCURITÉ

Le Dogger, ainsi que certains aquifères traversés pendant la foration, est éruptif (c'est le cas lorsque la pression de gisement est supérieure à la pression hydrostatique de la colonne de fluide dans le forage). Il est également possible de rencontrer des poches d'hydrocarbures sous pression (huile ou gaz) dans certaines zones du bassin. Enfin, il peut être nécessaire de fermer le forage avec les tiges à l'intérieur : ce peut être par exemple le cas d'une mise en sécurité du chantier en raison de vents soudains dépassant les vitesses admissibles par le mât de forage.

Pour s'affranchir des risques d'éruption qui peuvent résulter des différentes situations de crise, la machine de forage sera équipée du matériel de prévention suivant :

- un obturateur annulaire de type Hydril 13"5/8 série 3 000 psi ;
- un obturateur double à mâchoires avec fermeture sur tiges et fermeture totale ;
- un raccord avec sorties latérales (mud-cross) 13"5/8 série 3 000 psi comportant deux sorties 2" x 3 000 psi, (ou 1 spacer (raccord d'extension) d'air-lift série 3 000 psi) ;
- pour les programmes avec tubage en 7", un adaptateur 13"5/8 série 3000 psi x 11" série 3 000 psi ;
- une conduite d'injection sous pression (kill-line) ;

- une ligne de dusage (choke-line) ;
- un manifold de duse série 3 000 psi avec duse fixe et duse réglable ;
- une unité d'accumulation avec commande des obturateurs (BOP) à distance et sur le plancher ;
- un clapet anti-éruption pour tiges de forage 5" et 3"1/2 (Gray Valve ou similaire).

Le matériel de sécurité mis en œuvre doit respecter les prescriptions de l'article 41 du titre « forages » du RGIE et celles de l'arrêté ministériel du 22 mars 2000 relatif à la protection du personnel et à la maîtrise des venues dans les travaux de forage ou d'interventions lourdes sur des puits.

Le matériel de sécurité devra être opérationnel pendant toutes les phases de forage. Outre les vérifications de fonctionnement après installation, des contrôles pourront avoir lieu à tout moment sur demande du responsable du chantier.

3.9. LA MESURE DES PARAMÈTRES DE FORATION

La surveillance et le contrôle des paramètres de foration sont généralement assurés à la fois par l'entreprise de forage (contrôle instantané des principaux paramètres permettant la conduite du forage) et par des sociétés spécialisées (fluides de forage, géologie, déviation, cimentation, enregistrement de l'historique des paramètres).

En ce qui concerne l'entreprise de forage, celle-ci devra disposer au minimum des équipements suivants :

- poids au crochet (avec enregistreur) ;
- pression du circuit de refoulement de la boue (avec enregistreur) ;
- vitesse de rotation de la table ;
- couple de rotation (avec enregistrement si possible) ;
- nombre de coups de pompe ;
- indicateur de couple de serrage des clefs ;
- indicateur de déviation (de type TOTCO ou similaire) fonctionnant dans la gamme d'inclinaison de 0 à 8°, avec son équipement de repêchage ;
- une valise d'instruments de contrôle de la boue (densité, viscosité...).

Ce matériel doit être disponible et opérationnel pendant toute la durée des opérations, même lorsque des sociétés spécialisées viennent installer leurs propres systèmes de mesures.

D'autre part, l'entreprise fournira un rapport journalier au format API (« Daily Tally Sheet ») récapitulant poste par poste l'ensemble des opérations effectuées journalièrement.

Liste non exhaustive des principaux paramètres pouvant être mesurés ou enregistrés par les sociétés de service spécialisées :

M = Mesuré E = Enregistré

Paramètres de forage	Poids au crochet	M E
	Poids sur l'outil	E
	Vitesse de rotation	M E
	Couple de rotation	M E
	Vitesse d'avancement	E
Fluides de forage	Nombre de coups de pompe (débit)	M E
	Pression d'injection	M E
	Température (entrée et sortie)	M
	Densité (entrée et sortie)	M
	Viscosité (entrée et sortie)	M
	Filtrat	M
	Niveau des bassins	M E
Géologie	Log géologique	M
	Vitesse d'avancement au mètre foré	E
Déviation	Longueur forée	M
	Inclinaison	M
	Azimut	M
	Trajectoire théorique / trajectoire réelle	E
Cimentation	Paramètres rhéologiques du laitier (densité)	M E
	Pression d'injection	M E
	Débit d'injection	M E

3.10. LE TRAIN DE SONDE

Pour répondre aux objectifs de réalisation de forages au Dogger, le train de sonde (ou train de tiges) fourni par l'entreprise de forage devra comporter les éléments suivants :

- 2 300 m de tiges 5" de classe X95 ou G premium, ayant une capacité de traction supérieure à 160 tonnes ;
- dans le cas d'un programme avec tubage 7", il faudra également disposer de 2 300 m de tiges 3"1/2 de classe S, avec une capacité de traction de 112 t ;
- des masses-tiges (drill-collars), spiralées ou lisses selon disponibilité. Diamètres et quantité devront permettre de répondre aux recommandations de l'API en la matière (formulaire du foreur) ;
- deux stabilisateurs dans chaque diamètre de forage ;
- si le programme de forage l'exige, deux corps d'élargisseurs 17"1/2 et 24" (ou 23"). Les molettes et les bras de molettes équipant les corps des élargisseurs seront fournis séparément dans le lot « outils de forage » (à charge directe du maître d'ouvrage).

Les éléments du train de sonde devront faire l'objet de contrôles réguliers :

- toutes les 2 000 heures de rotation, contrôle de tiges par sonoscopie ;

- toutes les 6 000 heures de rotation, contrôle des masse-tiges et de l'ensemble des raccords (filetages) par magnafluxage ;
- des contrôles supplémentaires pourront être recommandés en cas de conditions sévères d'utilisation, par exemple à la suite d'une instrumentation.

Les outils de forage (tricônes) sont généralement fournis et choisis par le maître d'œuvre, afin de fournir le meilleur rapport vitesse d'avancement/longévité en fonction des terrains traversés et de la structure de l'ouvrage.

L'utilisation d'outils de type PDC (Polycristaline Diamond Carbide) est une solution onéreuse, mais qui se développe aujourd'hui en géothermie. C'est effectivement une solution performante en termes de vitesse d'avancement. Le choix économique de cette solution dépend principalement du type de contrat qui pourra être négocié avec le fournisseur des outils.

Le PDC, associé à l'usage d'un moteur de fond et du fait de ses capacités importantes en mètre, permet de bonnes vitesses d'avancement, limite le nombre de changement d'outils et réduit le nombre de manœuvres.

Parmi les inconvénients, on notera que la recherche de vitesses d'avancement importantes qu'impose la rentabilisation de ces outils peut inciter à faire passer au deuxième plan la qualité des travaux de foration (trajectoire, calibrage). D'autre part, les différents dispositifs de traitement des boues devront être dimensionnés pour répondre à ces vitesses.

3.11. LES MOYENS D'INSTRUMENTATION

Les moyens d'instrumentation sont très variés et doivent être adaptés au cas par cas lorsque des opérations d'instrumentation s'avèrent nécessaires. Ils seront fournis à la demande par des sociétés de service spécialisées. Néanmoins, l'entreprise de forage devra pouvoir tenir à disposition immédiate sur le chantier le matériel minimum suivant :

- des cloches de repêchage (Overshots) pour chacun des diamètres de la garniture de forage ;
- des colliers de repêchage à lames (Junk Catchers) pour les différents diamètres de forage (principalement 12"1/4, 8"1/2 et éventuellement 6").

L'utilisation de joints de sécurité permettant de remonter le train de tiges en cas de coincement du matériel de repêchage est recommandée.

3.12. LES MOYENS DE TUBAGE ET DE CIMENTATION

Les travaux de tubage et de cimentation sont réalisés *pro parte* par l'entreprise de forage et par des sociétés de service spécialisées. Le stockage, la manutention et la descente des tubages sont à la charge de l'entreprise de forage qui devra fournir :

- deux élévateurs de tubage dans chacun des diamètres prévus au programme, y compris le collier de manœuvre ;
- une tête de circulation pour chacun des diamètres de tubage ;
- le matériel nécessaire pour réaliser le vissage manuel des tubages (en particulier pour le 18"5/8) ;
- une passerelle de tubage.

Les clefs hydrauliques et les supports de tubage à coins (spider) sont le plus souvent fournis par les sociétés de services. On s'assurera que les clefs proposées permettent un vissage des tubages au couple de serrage recommandé par le fabricant.

Le matériel de cimentation descendu avec les colonnes (sabots, anti-retour, DV-collars, centreurs, bouchons, etc.) est commandé à des fournisseurs spécialisés.

La cimentation est réalisée par une société de service : fourniture du matériel, fabrication du laitier, injection. L'enregistrement en continu des paramètres rhéologiques (densité en particulier) et d'injection du laitier (débit, pression) est recommandé. Les enregistrements sont remis au maître d'œuvre et seront intégrés dans le dossier des ouvrages exécutés (DOE).

Les cimentations font l'objet des contrôles imposés par l'arrêté préfectoral autorisant les travaux.

3.13. LES ÉQUIPEMENTS DE CHANTIER

Le chantier doit comporter les équipements nécessaires à l'hygiène et à la sécurité des personnels tels que définis par le RGIE (se reporter en particulier au titre « forages »).

L'équipement général du chantier doit comporter le matériel et les facilités suivantes (liste non exhaustive) :

- un baraquement (chauffé, éclairé et meublé) pour le chef de chantier ;
- un baraquement similaire pour l'usage du superviseur de forage et du maître d'ouvrage ;
- un nombre suffisant de vestiaires et sanitaires pour le personnel présent sur le chantier ;
- le matériel de sécurité selon les dispositions imposées par les consignes de sécurité applicables aux chantiers de forage ;
- les extincteurs selon les normes et règlements en la matière ;
- l'éclairage du chantier et, selon nécessité, sa signalisation ;
- une pompe vide-cave ;
- 400 m de canalisation 6" ou 8" (flexibles ou rigide type irrigation) pour l'alimentation en eau du chantier ;

- les produits pour absorber des hydrocarbures ;
- une camionnette 1 500 kg ;
- un chariot élévateur ($\geq 3,5$ t).

3.14. LE MATÉRIEL DE MISE EN PRODUCTION

Le matériel de mise en production fournis par l'entreprise de forage doit comprendre :

- un raccord d'extension (spacer) 13"5/8 comportant une sortie 8", série 3 000 psi ;
- deux piquages 2" LP femelle équipés de bouchons ;
- une conduite d'évacuation (flow-line) 8" allant de la tête de puits au bac d'essai ;
- un bac d'essais avec chicane de tranquillisation et déversoir en V pour un débit allant de 100 à 350 m³/h.

Pendant les essais, l'entreprise de forage mettra son personnel à la disposition du maître d'ouvrage et mettra en œuvre les moyens nécessaires pour refroidir et évacuer les eaux d'essais (pompes, canalisations).

4. Critères de choix des diamètres de tubage

Dans un forage géothermique, le choix des diamètres de tubage va basiquement correspondre au débit d'exploitation attendu de l'ouvrage. Mais, ce choix est également soumis à nombreux critères techniques et économiques, dont les plus déterminants sont analysés ci-dessous.

4.1. CRITÈRES GÉNÉRAUX

D'une façon générale, les normes API (American Petroleum Institute), les contraintes mécaniques (en particulier poids et résistance à l'écrasement) liés à la profondeur d'installation des casings, les tolérances de diamètres permettant le télescopage des différentes colonnes, les contraintes liées aux objectifs du forage (géologie, tests et essais divers, protection d'aquifères intermédiaires, etc.), la puissance de la machine de forage, l'approvisionnement par les fabricants et les coûts sont, outre le débit de production, parmi les nombreux critères pouvant conduire au choix des diamètres de forage et de tubages lors de la réalisation d'un programme de forage.

Pour un forage géothermique réalisé en vue de capter le Dogger du Bassin parisien, les critères essentiels seront :

- la profondeur verticale des ouvrages : le toit du Dogger se situe en moyenne vers 1 600 m de profondeur, ce qui peut représenter jusqu'à 1 800 ou 2 000 m forés pour un forage dévié. Les profondeurs verticales et déviées détermineront la résistance mécanique des tubages à installer ;
- le débit de production des ouvrages : la production d'eau géothermale à partir du Dogger est rarement inférieure à 100 m³/h et peut atteindre jusqu'à 450 m³/h dans certains secteurs très productifs. La gamme de diamètres choisis devra permettre cette production sans induire des pertes de charge trop coûteuses en exploitation ;
- le forage de production devra comporter sur plus de 300 m de hauteur une chambre de pompage verticale permettant la mise en place du matériel d'exhaure (pompe immergée de diamètre nominal de 8" à 10" selon les débits) ;
- les aquifères d'eau douce, et en particulier les aquifères stratégiques de l'Albien et du Néocomien, doivent disposer d'une protection suffisante par double tubage cimenté pour assurer l'absence d'impact de l'opération de géothermie. La démonstration de la fiabilité de cette protection devra être établie ;
- il faut également envisager de pouvoir effectuer les interventions d'entretien ou les réhabilitations qui permettront d'augmenter la durée de vie des ouvrages ;
- enfin, le coût résultant sera un élément décisif pouvant influencer sur le choix définitif du diamètre.

4.2. LES PERTES DE CHARGE

Les pertes de charge dans le tubage de production dépendent principalement des éléments suivants :

- débit d'exploitation ;
- diamètres intérieurs des tubages ;
- longueur du ou des tubages de production ;
- état de surface à l'intérieur des tubages (coefficient de rugosité) ;
- température et viscosité du fluide exploité.

Les paramètres de débit, de longueur et les caractéristiques des fluides pompés étant fixés par le projet d'exploitation de la boucle géothermale, les seuls paramètres modifiables sur lesquels il semble possible de jouer sont le diamètre des tubages et le coefficient de rugosité. Le type de joints intervient de façon plus marginale.

Le **coefficient de rugosité** dépend pour une faible part du type de matériaux utilisé et principalement de l'état de surface. Il dépend également du type de joint utilisé pour raccorder les tubages. Les coefficients généralement retenus sont les suivants :

- coefficient nominal pour un tubage acier neuf : 0,3 mm ;
- coefficient pour un tubage ancien corrodé : 1,0 à 2,0 mm ;
- coefficient pour un tubage en composite : 0,002 à 0,0015 mm ;
- coefficient pour un tubage traité par inhibiteur : 0,2 à 0,1 mm.

Le tableau ci-après montre les pertes de charge obtenues pour 1 600 m de tubage 9"5/8 (diamètre intérieur de 224,4 mm) dans lequel transite à différents débits un fluide géothermal à 75 °C ayant une viscosité de 0,40 cp.

Les pertes de charge (en kg/cm²) sont calculées avec l'équation de Colebrook.

Débit m ³ /h	Rugosité 0,3 mm	Rugosité 1,0 mm
100	0,39	0,53
150	0,87	1,19
200	1,53	2,11
250	2,39	3,30
300	3,43	4,74
350	4,67	6,45

Quelle que soit la rugosité, quand on passe d'un débit de 100 à 350 m³/h, les pertes de charge correspondantes sont multipliées par 12.

À débit égal, par contre, le passage d'une rugosité de 0,3 mm à une rugosité de 1,0 mm n'intervient que pour un facteur de l'ordre de 1,4.

Si l'on considère que la détérioration de l'état des surfaces internes d'un tubage provient de la corrosion, il peut se présenter trois cas de figure :

- le premier, plutôt défavorable, où la corrosion engendre des dépôts diminuant le diamètre intérieur efficace du tubage ;
- le second, plutôt favorable, où le tubage n'est pas affecté par des dépôts (ou lorsque ceux-ci ont été nettoyés), la corrosion induisant une augmentation du diamètre intérieur efficace du tubage ;
- le troisième, également favorable, correspond au cas où le tubage est traité dès l'origine contre la corrosion par des produits « filmant » pouvant abaisser sensiblement son coefficient de rugosité ($< 0,3$ mm).

Le **diamètre des tubages de production** est fondamentalement conditionné par des considérations économiques et par des limitations techniques.

Les considérations économiques sont simples : le coût des ouvrages sera largement fonction des diamètres de forage et de tubage installés.

Techniquement, la gamme des tubages possibles pour ces profondeurs est restreinte à des diamètres allant de 6"5/8 à 10"3/4. Les tubages les plus petits (5"1/2) entraînent des pertes de charges importantes. Ils ne sont adaptés que pour des débits faibles ou des réhabilitations de forage initialement en 7". Les tubages de diamètres plus importants (13"3/8) imposent des machines de capacité supérieure capable de forer des puits déviés en très gros diamètres jusqu'au Dogger.

Les programmes de forage au Dogger sont, dans la plupart des cas, limités à un choix technique et économique qui se restreint classiquement à deux diamètres possible de tubage de production : le 7" et le 9"5/8.

Avec les mêmes éléments de calcul que précédemment, on peut comparer les pertes de charges en kg/cm^2 dans des tubages 7" et 9"5/8 neufs (coefficient de rugosité considéré comme égal à 0,3 mm) :

Débit m^3/h	Tubage 7" (159,4 mm)	Tubage 9"5/8 (224,4 mm)
100	2,32	0,39
150	5,19	0,87
200	9,20	1,53
250	14,35	2,39
300	20,65	3,43
350	28,08	4,67

Pour les deux tubages, le facteur d'augmentation des pertes de charge en fonction du débit reste le même (de l'ordre de x12 lorsque l'on passe de 100 à 350 m^3/h).

À débit égal et quelque soit le débit, la différence de pertes de charge entre les deux tubages est de l'ordre de x6.

Le diamètre des tubages de production apparaît donc comme le facteur prédominant des pertes de charge, assez loin devant l'état de surface qui n'a finalement qu'une modeste influence relative.

Nota : Les calculs ci-dessus considèrent que l'intérieur des tubages est homogène tout au long de la colonne. Dans le détail, ce n'est vrai ni pour les diamètres intérieurs (l'API permet une tolérance de fabrication non négligeable), ni pour la continuité hydraulique du fait de la présence de raccords pouvant, selon les types de joint utilisés, plus ou moins perturber l'écoulement des fluides.

4.3. LA CHAMBRE DE POMPAGE

Contrairement à la grande majorité des puits pétroliers de profondeur similaire, les débits d'exploitation des puits géothermiques au Dogger sont importants. Très rarement inférieures à 100 m³/h, ils peuvent atteindre plus de 450 m³/h pour certains.

L'exploitation des puits géothermiques impose la mise en place de pompes puissantes capables, d'une part, de soutirer les débits attendus à la production et, d'autre part, d'assurer des pressions de refoulement de l'ordre de 20 à 40 bars à l'injection. Si pour les puits d'injection, la pompe peut être placée en surface, ce n'est pas le cas du puits de production dont la pompe doit être immergée à des profondeurs souvent comprises entre 200 et 300 m sous la surface.

Les corps des pompes immergées (moteurs et étages de turbine) sont généralement d'un diamètre d'au moins 8" et au plus de 10".

Pour accueillir ces pompes, il faut prévoir la construction d'une chambre de pompage verticale jusqu'à une profondeur comprise entre 250 et 350 m :

- pour les pompes en 8", dans un diamètre minimum équivalent à celui d'un tubage 9"5/8 ;
- pour les pompes en 10", dans un diamètre minimum équivalent à celui d'un tubage 13"3/8.

Le puits de production sera donc, dans la plupart des cas, équipé d'un tubage 13"3/8 posé verticalement jusqu'à au moins 350 m de profondeur. Un tubage de production 7" ou 9"5/8, coupé à 350 m pour ménager la chambre de pompage, poursuivra la construction de l'ouvrage jusqu'au toit du Dogger avec une trajectoire verticale ou déviée.

Nota : Dans le cas d'un puits dévié, la construction d'une chambre de pompage verticale, impose de prévoir le début de la déviation (KOP – Kick Off Point) au moins plusieurs dizaines de mètres au-delà de la cote maximale prévue pour la mise en place de la pompe.

Le puits d'injection, par contre, pourra être équipé sur toute sa hauteur d'un tubage 7" ou 9"5/8 continu depuis la surface jusqu'au toit du Dogger.

4.4. ÉLÉMENTS DE CHOIX ENTRE TUBAGES DE PRODUCTION 7" ET 9"5/8

Les éléments guidant le choix d'un programme de forage vers la mise en place d'un tubage 7" ou 9"5/8 au toit du Dogger seront :

- le débit d'exhaure prévu sur la boucle qui conditionne le coût d'exploitation (pompage et réinjection) occasionné par les pertes de charge ;
- les surcoûts de forage et de matériel (temps, outils, fluides de forage, tubages et matériel de tubage, cimentation, matériel de pompage et de réinjection...) ;
- l'épaisseur des tubages qui conditionne pour partie la résistance à la corrosion et la durée de vie des ouvrages ;
- la possibilité de réhabiliter le forage en fin de vie en autorisant son chemisage par un tubage de plus petit diamètre.

Le tableau ci-après permet de comparer les puissances supplémentaires de pompage nécessaires entre un forage de production en 7" et le même forage réalisé en 9"5/8 (c'est-à-dire à longueur de tubage et à caractéristiques hydrodynamiques identiques) :

Débit m ³ /h	Écart de puissance kW
100	+5
150	+17
200	+37
250	+69
300	+114

Comparatif similaire pour le forage d'injection :

Débit m ³ /h	Écart de puissance kW
100	+6
150	+19
200	+43
250	+79
300	+131

Le surcoût d'exploitation pour la boucle géothermale (pompage et réinjection), sur la base d'un fonctionnement à 70 % de la puissance maximum et d'un kilowatt/heure à 0,05 €, sera de l'ordre de 310 € du kW par an.

Le surcoût consécutif à la réalisation des forages en plus gros diamètre (forage, tubage, cimentation, etc.) peut être estimé au minimum par forage à :

- durée travaux +10 jours, soit : + 150 k€ ;
- outils de forage et matériel divers : + 50 k€ ;
- tubage et matériel de cimentation : + 80 k€ ;
- cimentation : + 20 k€.

soit environ 300 k€ par ouvrage et 600 k€ pour un doublet. L'amortissement de ce surcoût de travaux nécessitera donc que les économies d'exploitation soient suffisantes.

Débit m ³ /h	Écart de puissance (doublet) kW	Surcoût de pompage annuel K€	Durée amortissement Années
100	+11	3,4	176
150	+36	11,2	54
200	+80	24,8	24
250	+148	45,9	13
300	+245	76,0	8

On peut donc constater que le surcoût engendré par les pertes de charge n'est pas négligeable et varient selon le débit d'exploitation. On peut considérer que jusqu'à 200 m³/h, les pertes de charge ne sont pas un facteur déterminant dans le choix du tubage, et qu'elles n'apparaissent comme vraiment sensibles qu'à partir de 250 m³/h. *(on notera que ces valeurs restent toutefois fonction de l'évolution du coût de l'électricité)*

Quatre autres éléments peuvent être pris en compte dans le choix des diamètres de tubages :

- la facilité de réalisation des ouvrages : il sera d'une façon globale plus facile de réaliser des forages en petit diamètre qu'en gros diamètre. Les programmes de déviation, en particulier, seront plus difficiles à réaliser en gros diamètres, surtout lorsqu'ils imposent de fortes inclinaisons (40° et plus) ;
- la qualité des cimentations (bon centrage du tubage, homogénéité de la fabrication et du déplacement du laitier, contrôle de la cimentation) : elle sera généralement plus facile à obtenir en petit diamètre qu'en gros diamètre ;
- l'épaisseur du tubage : c'est un critère qui détermine pour partie la résistance des tubages à la corrosion et la durée de vie des ouvrages. On disposera d'une épaisseur d'acier très légèrement supérieure dans le cas d'un tubage 9"5/8. On passe en effet d'une épaisseur de 9,19 mm pour un tubage 7" 26 lb/ft, à une épaisseur de 10,03 mm pour un tubage 9"5/8 40 lbs/ft (soit +0,84 mm) ;
- enfin, la mise en place d'un tubage 9"5/8 rend possible la réhabilitation ultérieure par rechemisage de l'ouvrage au moyen d'un tubage 7". Dans ce cas, la vie du doublet peut être prolongée à un coût acceptable, moyennant une augmentation des pertes de charges ou une baisse du débit d'exploitation.

Le tableau ci-après récapitule les principaux critères qu'il est proposé d'analyser pour déterminer le choix entre un programme avec tubage de production 7" et un programme avec tubage de production 9"5/8. Le critère globalement le plus favorable est indiqué pour chacun des diamètres :

Critères de choix		7"	9"5/8
Coût globaux	de réalisation d'exploitation	X	X
Pertes de charge et surcoût d'exploitation	jusqu'à 200 m ³ /h	X	X
	entre 200 et 250 m ³ /h	X	X
	au-delà de 250 m ³ /h	X	X
Facilité et qualité de réalisation des ouvrages	verticaux ou faible déviation	X	X
	forte déviation	X	
	cimentation	X	
Durée de vie des ouvrages	épaisseur de l'acier		X
	réhabilitation par rechemisage		X

4.5. AUTRES POSSIBILITÉS

D'autres diamètres que les deux principaux évoqués ci-dessus pourraient être envisagés en variantes :

- le 6"5/8 et le 7"5/8 pour les petits diamètres, en choix alternatif au 7" ;
- le 8"5/8 et le 10"3/4 pour les plus gros diamètres, en choix alternatif au 9"5/8.

Les critères de choix restent toutefois identiques à ceux proposés ci-dessus pour les tubages 7" et 9"5/8.

On notera toutefois que les faibles différences de diamètre ou d'épaisseur ne justifieront pas nécessairement à elles seules, sauf cas particulier, les avantages (gain sur le coût d'exploitation ou gain sur le coût d'investissement) que l'on peut espérer en ajustant le programme de forage à des diamètres moins couramment utilisés.

Diamètre nominal (inch)	Poids nominal (lbs/ft)	Diamètre intérieur (mm)	Épaisseur (mm)
6"5/8	24,0	150,4	8,94
7"	26,0	159,4	9,19
7"5/8	29,7	174,7	9,52
8"5/8	36,0	198,8	10,16
9"5/8	40,0	224,4	10,03
10"3/4	51,0	250,2	11,43

4.6. PROPOSITION DE PROGRAMMES DE TUBAGE

On trouvera ci-après quatre variantes de programmes de forage envisageables pour réaliser des forages au Dogger. Les programmes proposés vont varier selon :

- le choix du diamètre des tubages de production et d'injection (7" ou 9"5/8) ;
- le type de matériaux composant ces tubages (acier ou composite) ;
- la présence ou non d'un double tubage cimenté au droit des aquifères de l'Albien et du Néocomien. On notera que l'absence de ce double tubage cimenté dans un programme de forage n'est actuellement pas autorisée par la DRIRE. Le cas

particulier d'un tubage cimenté doublé par un tubage amovible en composite reste à étudier.

Pour ces programmes, on considèrera avoir à réaliser des forages déviés (1 700 m de profondeur verticale, 2 000 m maximum en profondeur forée), dont la déviation débute vers 450 m de profondeur. Les forages verticaux pourront avoir des programmes très similaires, mais n'auront pas à tenir compte des contraintes de la déviation.

Cette géométrie n'est pas une règle et de nombreuses variantes sont envisageables. Par exemple, la profondeur de l'amorce de la déviation, tout comme la géométrie de la trajectoire, peut varier selon les sites en fonction des déports finaux attendus. Les diamètres de forage retenus, ainsi que les puissances disponibles en foration (couple, traction), peuvent également influencer sur le choix de la géométrie des ouvrages. Il appartient au maître d'œuvre d'établir le programme de déviation le mieux adapté aux besoins et aux contraintes du projet.

Nota : dans le texte qui suit, le terme « build-up » correspond à la phase de prise d'inclinaison du forage, depuis la cote de l'amorce de celle-ci (KOP = Kick Off Point) jusqu'à l'obtention de l'angle maximum recherché (EOK = End Of Kick).

4.6.1. Tubage de production acier 7" (double tubage)

- Double tubage à l'Albien-Néocomien ;
- build-up en phase 12"1/4 protégé ensuite par tubage ;
- longueur maximum de découvert réduite (1 000 m en 8"1/2).

	Profondeur (m)	Forage (inch)	Tubage (inch)	Poids (lbs/ft)	Remarques
PRODUCTION	0-150	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-450	17"1/2	13"8	54,5	Chambre de pompage
	400-1 000	12"1/4	9"5/8	36,0	Tubage technique Couverture du build-up et de l'Albien
	400-2 000	8"1/2	7"	26,0	Tubage de production
INJECTION	0-150	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique optionnel
	0-450	17"1/2	13"8	54,5	Tubage technique
	0-1 000	12"1/4	9"5/8	36,0	Tubage technique Couverture du build-up et de l'Albien
	0-2 000	8"1/2	7"	26,0	Tubage d'injection

4.6.2. Tubage de production acier 9"5/8 (double tubage)

- Double tubage à l'Albien ;
- build-up en phase 17"1/2 protégé ensuite par un tubage ;
- longueur maximum de découvert réduite (1 000 m en 12"1/4).

	Profondeur (m)	Forage (inch)	Tubage (inch)	Poids (lbs/ft)	Remarques
PRODUCTION	0-150	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-1 000	17"1/2	13"8	54,5	Chambre de pompage Couverture du build-up et de l'Albien
	400-2 000	12"1/4	9"5/8	40,0	Tubage de production
INJECTION	0-150	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-1 000	17"1/2	13"8	54,5	Couverture du build-up et de l'Albien
	0- 2 000	12"1/4	9"5/8	36,0	Tubage d'injection

4.6.3. Tubage de production acier 9"5/8 (simple tubage)

- Pas de double tubage à l'Albien (et donc non agréé par la DRIRE) ;
- build-up en phase 12"1/4 non protégé par un tubage ;
- longueur maximum de découvert important (1 500 m en 12"1/4).

	Profondeur (m)	Forage (inch)	Tubage (inch)	Poids (lbs/ft)	Remarques
PRODUCTION	0-400	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-1 000	17"1/2	13"8	54,5	Chambre de pompage
	400-2 000	12"1/4	9"5/8	40,0	Tubage de production
INJECTION	0-150	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique optionnel
	0-500	17"1/2	13"8	54,5	Tubage technique
	0-2 000	12"1/4	9"5/8	36,0	Tubage d'injection

Nota : la pose d'un simple tubage face à l'Albien, particulièrement en forage dévié, risque d'engendrer un certain nombre de désordres qui peuvent engager la pérennité des ouvrages : mauvaise calibration ou cavage des zones friables de l'Albien pendant le build-up, conduisant le plus souvent à une médiocre qualité de la cimentation au droit de ces mêmes zones. La longueur du découvert pendant la phase 12"1/4 aggrave singulièrement ce risque.

4.6.4. Tubage technique 13"3/8 et colonne de production composite 9"5/8 amovible

- Pas de double tubage cimenté à l'Albien, mais présence d'un deuxième tubage amovible en composite (nécessite une acceptation préalable du programme par la DRIRE) ;
- build-up en phase 17"1/2 non protégé ;
- longueur très importante de découvert en gros diamètre (1 600 m en 17"1/2).

	Profondeur (m)	Forage (inch)	Tubage (inch)	Poids (lbs/ft)	Remarques
PRODUCTION	0-400	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-2 000	17"1/2	13"8	61,0	Tubage technique
	0-2 000	-	9"5/8 et 11"1/2		Composite posé en liner
INJECTION	0-400	24"	18"5/8	87,5	Tubage technique
	0-2 000	17"1/2	13"8	61,0	Tubage technique
	0-2 000	-	9"5/8		Composite posé en liner

Nota : outre des surcoûts importants (mais qui peuvent se justifier à long terme), on soulignera que cette solution implique des contraintes de forage importantes :

- réalisation sans incident d'un forage dévié en 17"1/2 avec un découvert extrêmement important (1 600 m), incluant la phase de build-up et mettant en contact possible l'ensemble des aquifères traversés (ce qui augmente les risques et les difficultés en cas de problème) ;
- une cimentation optimale avec des DV 13"3/8 dont on reconnaît le peu de fiabilité en gros diamètre, tout particulièrement lorsqu'elles ont à subir les contraintes mécaniques des déviations. En cas d'échec, la cimentation de « rattrapage » ne pourra être qu'un pis-aller avec perforations ouvrant sur un annulaire en communication avec de nombreux aquifères (Albien, Cénomaniens, Lusitanien, Dogger) ;
- la qualité de l'étanchéité dépend d'un centrage soigné des colonnes déterminant un annulaire régulier et permettant un remplissage homogène par le laitier de ciment. C'est un objectif difficile à atteindre quand il s'agit d'un tubage 13"3/8, particulièrement rigide et d'un poids conséquent, installé dans un puits dévié. Le risque de décentrage de la colonne est particulièrement significatif dans la partie supérieure de la déviation, zone où se situe un maximum de contraintes (traction dû au poids et courbure du build-up) et qui est pour partie située dans l'environnement sensible de l'Albien et du Cénomaniens ;
- actuellement, des procédures de contrôles fiables et faciles à mettre en œuvre et à interpréter restent à développer pour permettre le suivi de l'évolution de l'état de l'ouvrage, tant pour le tubage acier (caché derrière le tubage composite) que pour le tubage composite lui-même.

5. Critères de choix des matériaux de cuvelage

Les tubages servent à la fois à la construction des forages et de lien entre le réservoir géothermal profond et la surface. Ils ont pour rôle principal de :

- soutenir les parois du forage (résistance à l'écrasement) ;
- isoler et protéger les zones non captées (étanchéité) ;
- transporter les fluides du réservoir vers la surface et résister aux effets des variations de température et de pression ;
- accueillir du matériel de mesure ou/et de production (tubing de traitement, pompe) ;
- supporter différentes contraintes pendant les interventions de forage, de maintenance et de servicing.

La durée de vie des tubages, et par conséquent la durée de vie des ouvrages, sera directement liée à la qualité de leur mise en place (en particulier de la cimentation) et à leur capacité à résister aux agressions (chimiques et bactériologiques) des milieux avec lesquels ils sont en contact. Différents matériaux sont disponibles sur le marché :

- les tubages en acier API de l'industrie pétrolière ;
- les tubages en aciers spéciaux ;
- les tubages ou tubings en acier revêtu ;
- les tubages et tubings en matériaux composites.

Ce chapitre analyse les avantages et inconvénients des différents matériaux afin de proposer le choix le mieux adapté aux besoins : résistance mécanique, résistance à la corrosion, mise en œuvre, coûts.

On analysera également les différents joints de tubage disponibles permettant les connections en assurant l'étanchéité des raccords.

5.1. LES TUBAGES EN ACIER API

Les tubages en acier proposés par l'industrie pétrolière répondent très bien aux obligations mécaniques inhérentes à la construction de forages profonds, mais sont sensibles à la corrosion par les fluides géothermaux.

Différentes nuances d'acier (grade) sont disponibles sur le marché : K55, C75, N80, C95, P110, etc. Ces nuances conditionnent à la fois les caractéristiques mécaniques des aciers et leur résistance à différentes formes de corrosion.

Les études réalisées par les métallurgistes et les chimistes, ainsi que le retour d'expérience des projets réalisés dans les années 1980, montrent que la nuance d'acier K55 (acier au carbone standard) est celle qui, parmi les aciers de type pétrolier,

semble la mieux adaptée à l'exploitation des eaux du Dogger. Elle reste toutefois très largement soumise aux effets de la corrosion chimique et bactérienne et nécessite impérativement, pour limiter les effets de cette corrosion, d'être protégée par la mise en place de traitements chimiques et/ou des précautions préventives particulières.

La vitesse de corrosion des tubages a fait l'objet de nombreuses études et de suivis scientifiques à la suite des constatations faites sur les premières opérations réalisées au Dogger. On sait qu'elle est directement fonction des conditions d'exploitation, de la qualité chimique des eaux géothermales et des effets de la prolifération bactérienne (bactéries existantes *in situ* ou introduites par les opérations de forage). Aujourd'hui, sans toutefois l'empêcher totalement, les méthodes de traitement permettent de limiter très largement la corrosion des tubages en acier standard.

La vitesse moyenne de corrosion des tubages non traités sur les ouvrages exploitant le Dogger du Bassin parisien est d'environ 1 mm/an. Avec un traitement anticorrosif adéquat des puits, cette vitesse est réduite à 0,1 mm/an, ce qui veut dire qu'un casing de production en 7" ou 9"5/8 mettra 50 années pour perdre la moitié environ (5 mm) de son épaisseur.

Acier API K55	Avantages	Inconvénients
Résistance à l'écrasement	Standard	
Résistance aux agressions mécaniques	Très bonne	
Filetage (vissage, étanchéité)	Bonne résistance et étanchéité	
Encombrement	Standard	
Accrochage cimentation	Bonne	
Résistance corrosion		Sensible, traitement nécessaire
Coût	Moyen	

Lors de l'utilisation de tubages en acier API, on recommandera :

- de s'assurer de l'homogénéité métallurgique et dimensionnelle de la colonne en utilisant des tubages issus d'une même coulée. Les normes API sont en effet suffisamment souples pour permettre des variations sensibles de la qualité des aciers (coulées) et des diamètres intérieurs (tolérances sur les mandrins), ces variations pouvant se montrer préjudiciables en cours d'exploitation ;
- d'éviter la juxtaposition de tubages de grades différents en raison des risques de corrosion dûs à des potentiels Redox différents ;
- de préférer des tubages neufs à des stocks anciens dont l'origine est incertaine et qui peuvent avoir subi des dégradations ;
- d'éviter autant que possible toute intervention par soudure (dégradation de la qualité de l'acier).

Conclusion : les cuvelages en acier API de grade K55 ont été mécaniquement conçus pour une utilisation en forage profond. Ils sont par contre sensibles à la corrosion induite par les fluides géothermaux qui peut considérablement réduire la durée de vie

des ouvrages. Leur usage impose donc la mise en place de moyens de prévention et de traitements adaptés afin de lutter contre les attaques de la corrosion.

5.2. LES TUBAGES EN ACIERS SPÉCIAUX

Les tubages en acier spéciaux résistent mieux à certains types de corrosion, mais sont souvent mécaniquement moins résistants, fragiles vis-à-vis de certaines agressions mécaniques, difficiles à mettre en œuvre et surtout beaucoup plus coûteux.

Les tubages en acier inoxydable (inox AISI 316 L par exemple) résistent mal aux agressions chimiques des eaux du Dogger. La présence d'H₂S peut notamment provoquer une corrosion par piqûres et des modifications dans la structure cristalline, provoquant des fissurations qui diminuent au fil du temps sa résistance mécanique.

D'autre part, les aciers inoxydables sont relativement tendres. On notera :

- à diamètres égaux, la nécessité de sur-épaissir les tubages pour obtenir des caractéristiques mécaniques similaires à celles des aciers pétroliers ;
- une forte sensibilité aux agressions mécaniques et à l'usure rendant difficile leur usage, particulièrement en puits dévié où le battage du train de tiges peut sérieusement les endommager ;
- des difficultés bien souvent notées au vissage, avec des endommagements fréquents des filetages, et une sensibilité très importante aux couples de serrage (avec pour résultat des étanchéités pouvant s'avérer insatisfaisantes) ;
- un mauvais accrochage (bonding) du ciment qui a tendance à ne pas coller de manière satisfaisante à l'acier. Cet inconvénient peut être combattu par un sablage (ou un résinage) préalable de l'acier. Mais cette préparation augmente le coût déjà très élevé du matériel.

Il paraît donc difficile d'envisager l'utilisation des aciers inoxydables comme cuvelage dans la construction des forages profonds, particulièrement en puits déviés. Leur utilisation est par contre assez fréquente comme matériaux constitutif des crépines (facilité de façonnage, résistance mécanique facilement adaptable aux besoins par la mise en œuvre de renforts des structures, coûts acceptables du fait des longueurs réduites).

Acier spéciaux	Avantages	Inconvénients
Résistance à l'écrasement		Faible, implique un sur-épaississement des parois et des manchons
Résistance aux agressions mécaniques		Moyenne, facilement déformable ou rayable
Filetage (vissage, étanchéité)		Fragile, mise en œuvre difficile
Encombrement		Légère surépaisseur
Accrochage cimentation		Très moyen, sablage recommandé
Résistance corrosion		Sensible à l'H ₂ S

Coût		Très élevé (x10)
------	--	------------------

Conclusion : mécaniquement beaucoup moins résistants que les cuvelages en acier API, les aciers inoxydables ou spéciaux résistent mal à la corrosion en milieu H₂S. Leur fragilité mécanique ainsi que le coût très élevé de ces aciers rendent leur utilisation difficilement envisageable comme matériau de cuvelage, sauf à faire appel à des alliages très particuliers aux coûts prohibitifs.

5.3. LES TUBAGES EN ACIER REVÊTU

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, poinçonnages, rayures, frottements) et de ce fait totalement incompatibles avec des actions de forage ou de servicing. On réservera donc leur usage à des complétions dans lesquelles on ne descendra pas de matériel pouvant endommager le revêtement : tubings ou colonnes d'exhaure de pompe, colonne de production amovibles.

Acier revêtu	Avantages	Inconvénients
Résistance à l'écrasement	Idem acier	
Résistance aux agressions mécaniques		Très fragile, détérioration facile
Filetage (vissage, étanchéité)	Bonne étanchéité	Mise en œuvre délicate
Encombrement	Faible surépaisseur	
Accrochage cimentation	Idem acier	
Résistance corrosion	Excellente si revêtement intact	
Coût		Élevé

Conclusion : les aciers revêtus sont totalement incompatibles avec toute action de forage ou de servicing. Il faut donc strictement les réserver à des tubages (ou tubing) amovibles.

5.4. LES TUBAGES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Dans l'absolu, les tubages en matériaux inaltérables (composite fibre de verre – résine Epoxy par exemple) présentent l'avantage d'être quasiment insensibles à la corrosion.

Néanmoins, à la suite de petits défauts de fabrication ou d'endommagements même minimes de leur structure ou de leur revêtement de surface, les composites (fibres de verre + résine + charge) peuvent réagir à certaines attaques chimiques, devenir poreux et/ou perdre leur cohésion (bullage, désolidarisation de la fibre et du liant). Comme les tubages revêtus, ils sont extrêmement sensibles aux agressions mécaniques, avec en particulier un risque de détérioration à partir de la moindre blessure du revêtement.

Mécaniquement, les tubages en fibre de verre sont beaucoup moins résistants que les tubages acier, ce qui impose des épaisseurs de matière plus importantes et des manchons surdimensionnés, d'où un encombrement général nettement supérieur. Pour un diamètre nominal donné de forage, on aura donc un diamètre intérieur de tubage largement réduit. Inversement, pour conserver un diamètre intérieur nominal donné de tubage, on se trouvera dans l'obligation de forer dans un diamètre nettement supérieur.

On notera que ce matériau est extrêmement sensible à toutes les agressions mécaniques (poinçonnage, rayure, frottement, battement) et donc généralement peu compatible avec l'utilisation de la plupart des outils utilisés en forages profonds (tricône, stabilisateur, train de tiges...), particulièrement quand ceux-ci sont déviés.

Il faut signaler enfin un manque réel de connaissance sur le vieillissement des tubages et tubings en composite et l'absence de moyens de contrôle *in situ* permettant de s'assurer de l'intégrité du tubage. On ne sait aujourd'hui suivre l'évolution des tubages installés qu'en observant l'éventuelle présence de fibres dans les filtres installés sur le réseau de surface lorsqu'il s'agit du puits producteur.

Parmi les principaux éléments à prendre en compte lorsque l'on envisage la mise en place d'un tubage en fibre de verre à grande profondeur, on notera :

- de s'assurer de la résistance mécanique du tubage : les tubes devront pouvoir résister aux contraintes mécaniques attendues (pression d'écrasement, pression d'éclatement) et se référer en la matière aux recommandations de l'API (American Petroleum Institute) et de l'IADC (International Association of Drilling Contractors). Les contraintes de diamètre correspondant aux surépaisseurs de matière attendues tant sur le corps des tubages qu'au niveau des manchons devront être très précisément évaluée lors de la rédaction du programme de forage ;
- le choix des joints de tubage : le type des joints, le type de filetage, les éventuels joints d'étanchéité et graisses de vissage, la résistance mécanique (écrasement, arrachage) des tubes et raccords en matériaux composites sont très variables. De la même manière que pour les tubes, on s'attachera à s'assurer que les recommandations de l'API et de l'IADC sont respectées ;
- l'étanchéité des joints de tubage, au moment de la mise en place et dans le temps, devra être strictement assurée. Si des joints d'étanchéité sont utilisés (sur épaulement ou en butée), on s'assurera que les matériaux utilisés pourront résister aux conditions d'exploitation (température, chimie des eaux) et au vieillissement ;
- la qualité de fabrication : la résine et la fibre doivent être parfaitement liées. Une bulle d'air résiduelle peut en effet être soumise à des pressions telles en fond de puits qu'elle pourrait faire littéralement « exploser » la structure de la fibre dans la section de tubage concernée ;
- les procédures de vissage des tubes devront assurer une connexion fiable, au couple déterminé par le constructeur, sans détérioration du filetage et de l'étanchéité des joints ;

- les procédures de mise en place du tubage : la faible densité des matériaux composites pose le problème de flottaison lors de la descente de ce type de tubage. Le programme de forage devra préciser les moyens mis en œuvre pour permettre une descente et une mise en place correcte de la colonne ;
- lorsqu'un tubage composite est cimenté, il faut tenir compte des éléments particuliers suivants :
 - la difficulté à réaliser certaines phases de cimentations : centrage efficace de la colonne, intégration des accessoires de cimentation dans la colonne (sabot, diverting valve...), opération de reforage du ciment et des bouchons,
 - la difficulté à obtenir une bonne adhérence du ciment (bonding) sur ce type de matériau. Pour favoriser cette adhérence, certains professionnels recommandent le sablage de l'extrados des tubes. Cette solution, certainement efficace, a toutefois l'inconvénient d'un coût particulièrement élevé (+20 à +30 %),
 - l'appréciation du contrôle de la qualité du ciment. Déjà difficile sur un tubage acier, cette évaluation le devient encore plus sur un tubage composite. En effet, les diagraphies « soniques » habituels (CBL) ne sont pas adaptées aux matériaux composites. Seule la présence ou l'absence de ciment peut éventuellement être observée au moyen d'un log de température. Mais ce type de mesure ne permet pas de juger de la qualité de l'adhérence et de la régularité du remplissage annulaire,
 - les effets des variations de température sur le tubage. Si leurs incidences sont le plus souvent acceptables et la plupart du temps sans effet sur un tubage acier, ils seront plus difficiles à maîtriser sur un tubage composite, structurellement plus fragile et dont la cimentation est moins bien contrôlée ;
- les contraintes que l'on peut attendre lors des opérations postérieures à la mise en place des tubages (éventuelle phase de forage, travaux d'exploitation, travaux d'entretien) doivent être analysées pour s'assurer qu'elles ne sont pas incompatibles avec l'usage des matériaux composites ;
- enfin, les surcoûts induits par l'utilisation de ce matériau devront être évalués en prenant en compte l'ensemble des avantages et inconvénients (forage, exploitation, entretien).

De la même manière que les tubages en acier revêtus, on préférera réserver leur utilisation à des tubings amovibles (tubing, colonne d'exhaure de pompe, colonne de production amovibles).

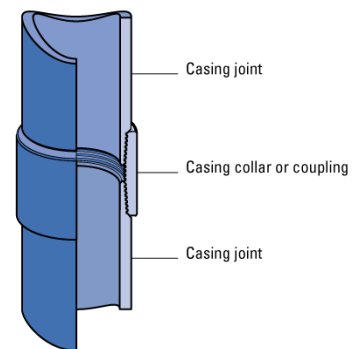
Composites	Avantages	Inconvénients
Résistance à l'écrasement		Faible, implique un sur-épaississement des parois et des manchons
Résistance aux agressions mécaniques		Très fragile, détérioration facile
Filetage (vissage et étanchéité)		Fragile, mise en œuvre difficile
Encombrement		Forte surépaisseur
Accrochage cimentation		Très moyen, sablage recommandé
Résistance corrosion	Bonne si surfaçage intact	
Coût		Élevé à très élevé

Conclusion : les matériaux composites sont fragiles et incompatibles avec la plupart des actions de servicing. Il faut donc les réserver à des utilisations comme tubages amovibles (tubing de complétion ou d'exhaure).

5.5. LES JOINTS DE TUBAGE

Les joints de tubage (« casing collar » ou « coupling ») doivent être choisis à la fois parmi ceux fournissant une résistance mécanique adaptée aux contraintes (traction) subies lors de la mise en place du tubage et ceux garantissant une étanchéité optimale de la colonne.

Pour les tubages transportant le fluide géothermal, on pourra également préférer les joints de tubage offrant la meilleure continuité hydraulique, afin de minimiser les pertes de charges.



L'assurance d'une bonne étanchéité est particulièrement importante dans les cas suivants :

- puits fortement déviés induisant des contraintes mécaniques importantes lors de la mise en place des tubages ;
- zones de traversée d'aquifères protégés (Albien, Cénomaniens) ;
- tubages en contact avec le fluide géothermal (colonnes de production) ;
- surpression importante en exploitation (colonnes d'injection) ;
- tubages non cimentés (colonnes amovibles).

Quatre grands types de filetage sont disponibles pour les casings acier :

- les joints à manchon **API** sont les filetages les plus standards. Le filetage est arrondi, légèrement conique (6,25 %). Il présente une discontinuité hydraulique marquée. On les réservera aux tubages techniques cimentés ;
- les joints à manchon **BUTTRESS** fournissent une étanchéité supérieure à celle de l'API et permettent un vissage facile. Le filetage est carré, légèrement conique (6,25 %). Ces joints présentent une discontinuité hydraulique sensiblement similaire à celui de l'API. On les utilisera préférentiellement pour les tubages de gros diamètre (18"5/8 ou plus), en particulier pour ceux qui se trouveront en contact direct avec l'eau géothermale ;
- les joints à manchon **VAM** fournissent une étanchéité optimale. Il s'agit d'une variante des filetages de type BUTTRESS caractérisée par un raccordement qui vient se bloquer en butée sur des épaulements. Il offre ainsi une étanchéité supérieure et une continuité hydraulique quasiment parfaite. Ce type de joint sera

donc particulièrement recommandé pour tous les tubages en contact direct avec l'eau géothermale ;

- les joints de type **EXTREME-LINE**, sans manchon, avec des filetages carrés à forte conicité (> 10 %), présentent une très bonne étanchéité. Un des avantages des tubages Extreme-Line est d'avoir des raccords lisses ne comportant qu'un faible épaulement (ce qui peut présenter un avantage en puits très fortement dévié). La résistance mécanique de ces joints est généralement légèrement supérieure à celle des joints vus précédemment. L'inconvénient majeur est l'existence d'un sur-épaississement interne au niveau du raccordement, induisant une réduction locale du diamètre intérieur. La discontinuité hydraulique résultante est relativement importante au droit du raccordement du fait de la modification de diamètre, bien qu'elle ne soit que très légèrement marquée au droit du raccord de filetage lui-même. Ces joints sont très rarement utilisés en géothermie (il n'y a pas d'exemple connu en France). Compte tenu de leurs spécifications (diamètre intérieur variable), ils ne seront recommandés que pour des usages en tubes amovible.

Dans tous les cas, on veillera à appliquer scrupuleusement les couples de serrage recommandés par les constructeurs. 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 préjudiciable à la résistance mécanique du raccordement ou/et à son étanchéité.

Les recommandations que l'on peut faire pour un choix optimal des joints de tubage seraient donc :

Tubage	Diamètre	Optimum	Minimum
Tubage technique	7" à 13"3/8 18"5/8 et plus	API Buttress	API API
Chambre de pompage	9"5/8 à 13"3/8	VAM	Buttress
Tubage de production	7" à 9"5/8	VAM	Buttress
Tubage d'injection	7" à 9"5/8	VAM	Buttress
Tubing ou colonne amovible	Tous diamètres	n.d.	n.d.

5.6. CONCLUSION SUR LE CHOIX DES MATÉRIAUX DE TUBAGE

En conclusion, on peut retenir que l'usage des tubages en acier de grade pétrolier reste quasiment incontournable pour la réalisation des forages profonds au Dogger, particulièrement lorsqu'il s'agit de forages déviés en gros diamètre. Mais il est néanmoins tout à fait envisageable, bien que généralement beaucoup plus coûteux, d'installer dans les forages, une fois ceux-ci réalisés, des colonnes amovibles (ou pourquoi pas fixes) en matériaux inaltérables servant à la production et à l'injection des fluides, évitant ainsi un contact direct entre l'acier des cuvelages et l'eau du réservoir géothermal.

Malgré l'intérêt évident que présente cette solution pour la pérennité des ouvrages, les colonnes amovibles en composites comportent néanmoins des inconvénients qu'il

faudra précisément évaluer lors du choix de la construction des ouvrages. On notera en particulier :

- un coût de réalisation des ouvrages nettement plus élevé ;
- un coût de production augmenté du fait des pertes de charge plus importantes résultant de la perte de diamètre induite par la mise en place de la colonne amovible en composite ;
- un surcoût en cas d'intervention en fond de puits : une dépose et repose de la colonne s'avère alors quasi obligatoire pour ne pas risquer de la détériorer avec les outils descendus dans le puits.

6. Comparatif des programmes de forage envisageables

Différents types de programmes de forage sont envisageables selon les objectifs, les moyens et les contraintes rencontrés sur chaque projet. On discutera ci-après des avantages et des inconvénients des principales variantes que l'on pourra rencontrer :

- forages verticaux ou forages déviés ;
- tubage de production en 7" ou tubage de production en 9"5/8 ;
- tubages en acier ou tubages composites ;
- tubings de production amovibles ou cuvelages fixes.

6.1. FORAGES VERTICAUX OU FORAGES DÉVIÉS

La distance optimale entre les puits de production et de réinjection au niveau du réservoir est fonction des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir et des paramètres de l'exploitation (débit, durée). Elle conduit dans le Dogger à un écart le plus souvent compris entre 1 000 et 1 500 m. Choisir de réaliser des forages verticaux ou déviés va dépendre de paramètres techniques et économiques divers.

6.1.1. Réalisation de forages verticaux

L'accessibilité des terrains en surface est généralement le point le plus sensible. En milieu urbain dense, il est souvent difficile (voire impossible) de pouvoir disposer, à la verticale des emplacements prévus, des deux terrains nécessaires pour installer les plateformes correspondantes.

Il faut prendre en compte les surcoûts correspondant à la réalisation et à la maintenance ultérieure de deux plateformes au lieu d'une seule.

Il y a également un surcoût correspondant au déplacement de la machine de forage et au transport de l'ensemble du matériel d'une plateforme à l'autre distante de plus d'un kilomètre.

Le réseau primaire (liaison entre puits de production et puits de réinjection) va également représenter un surcoût non négligeable, tant pour sa réalisation que pour sa maintenance.

Les moins-values correspondent essentiellement à la réalisation des ouvrages : technologie simplifiée, minimalisation des longueurs forées et des longueurs des tubages installés.

On notera également une réduction des risques en forage, même si cette notion est difficile à quantifier.

D'autre part, la qualité des ouvrages (et donc leur pérennité) est souvent considérée comme meilleure dans le cas de forage verticaux : géométrie mieux contrôlée du trou foré, trajectoire verticale limitant les contraintes mécaniques sur les tubages, qualité des cimentations.

On notera enfin qu'un doublet de forages verticaux impose une boucle géothermale comportant un réseau primaire important en surface pour relier les deux forages. Ce réseau de surface génère un ensemble de risques et de contraintes, liés au transport à gros débit et sous pression élevée d'un fluide chaud, agressif et potentiellement polluant, qui devront être gérés en contexte urbain. On a pu constater par exemple sur le projet d'Evry la difficulté que pouvait présenter cette liaison entre les deux forages.

6.1.2. Réalisation de forages déviés

Les deux têtes de puits sont situées sur une seule plateforme à une dizaine de mètres l'un de l'autre.

Le ripage de la machine de forage d'un puits à l'autre ne nécessite que des moyens réduits. Le matériel annexe n'est pas déplacé.

La longueur du réseau primaire est réduite au minimum.

Les surcoûts correspondent principalement à la technologie mise en œuvre pour réaliser la déviation (temps passé, moyens en homme et en matériel) et au métrage de forage et de tubage nécessairement plus important que pour un forage vertical. Ce surcoût peut être estimé à 30 % environ.

On notera également que les risques en forage sont nécessairement plus importants que pour un forage vertical (risque de coincement ou de collage en particulier), même si cette notion est difficile à quantifier.

Enfin, la qualité des ouvrages peut parfois être influencée par la déviation du fait de la géométrie particulière imposée par la déviation, des contraintes mécaniques plus importantes que subissent les tubages et de la difficulté accrue d'obtenir une cimentation régulière dans les annulaires (ovalisation et irrégularité géométrique du trou foré, qualité et efficacité du centrage).

6.2. TUBAGES DE PRODUCTION EN 7" OU 9"5/8

Les critères de choix entre les différents diamètres de tubage envisageables ont déjà été largement abordés dans le chapitre 4 « Choix des diamètres ». Fondamentalement, le choix des diamètres des colonnes productrices relève avant tout de deux critères :

- le débit prévu en exploitation : on a vu que, jusqu'à un débit de 200 m³/h, l'utilisation d'un tubage 7" n'est pas particulièrement pénalisant. Par contre, à partir de 250 m³/h, le tubage 9"5/8 s'impose sans conteste ;
- la possibilité d'un rechemisage ultérieur : en fin de vie des forages (une trentaine d'années), l'existence d'un tubage 9"5/8 peut permettre d'envisager sans trop de contraintes la pose d'un tubage de diamètre inférieur (7"), ce qui permet de pouvoir doubler la durée de vie du doublet de manière conséquente pour un coût acceptable.

6.3. TUBAGES EN ACIER OU TUBAGES COMPOSITES

Une discussion sur les matériaux (chapitre 5 « Choix des matériaux de cuvelage ») a fourni les éléments de comparaison entre les différents produits disponibles ou envisageables. Les résultats de cette discussion montrent que l'utilisation de tubages en acier standard reste incontournable pour construire un ouvrage résistant aux efforts et contraintes mécaniques subies par les ouvrages pendant la foration, particulièrement en puits déviés.

Néanmoins, la pose d'un tubing de production (amovible ou non) en matériaux composites ou en acier revêtu reste une option envisageable du fait de son inertie importante aux phénomènes de corrosion. Malgré l'intérêt évident que présente la mise en place de ce type de tubages ou de tubings pour la pérennité des ouvrages, les colonnes en composite comportent certains inconvénients qu'il faudra précisément évaluer lors du choix de la construction des ouvrages. On notera en particulier :

- un coût de réalisation des ouvrages nettement plus élevé. Il a été évalué à plus de 210 % pour le forage PM4 de Melun-l'Almont : le surcoût de la mise en œuvre du composite (augmentation du diamètre de forage, colonne composite et mise en œuvre) a été évalué à 10,5 MF HT pour un montant total des travaux de 19,7 MF HT (source : fiches techniques ARENE) ;
- un coût de production augmenté du fait des pertes de charge plus importantes résultant de la perte de diamètre induite par la mise en place de la colonne en composite ;
- un surcoût en cas d'intervention en fond de puits : une dépose et repose de la colonne s'avère alors quasi obligatoire, en particulier en puits dévié, afin de ne pas détériorer le matériau. Mais il est vrai que ces interventions devraient être exceptionnelles.

Il est important de signaler que le composite n'est pas nécessairement la panacée permettant de s'affranchir de tous les problèmes. À ce jour, aucun retour d'expérience sur le vieillissement et la longévité d'un tubage composite n'est disponible. Le projet géothermique de Melun-l'Almont, qui dispose depuis 1996 d'un forage comportant une colonne de production en fibre de verre, ne fournit pas de données réellement utilisables quant à l'état de la structure du composite après ces années de fonctionnement. *A priori*, des tests d'étanchéité réalisés ne montrent aucune anomalie. Mais rien n'est disponible sur l'évolution réelle du matériau.

Nota : à ce sujet, il pourrait être intéressant de mettre en place, en tête de puits de production, des filtres capables de récupérer d'éventuelles fibres de verre annonciatrices d'une déstructuration progressive du matériau. Cela permettrait de mettre en évidence une libération progressive ou non des fibres de verre si la résine servant de liant perd sa cohésion.

En conclusion, on peut dire que le choix économique entre tubage acier et tubage composite, vu son impact important, n'est et ne sera jamais simple. Il doit faire l'objet d'une évaluation dans chaque cas d'exploitation, en tenant compte des avantages et inconvénients apportés par chacun des matériaux.

6.4. COLONNES DE PRODUCTION AMOVIBLES OU CUVELAGES FIXES

Le choix entre l'installation de tubages de production fixes et de colonnes de production amovibles rejoint et complète les préoccupations rencontrées dans le paragraphe précédent et dans les chapitres concernant le choix des diamètres (chapitre 4) et le choix des matériaux (chapitre 5).

Pour une meilleure compréhension, on rappellera le vocabulaire utilisé dans la technologie du forage pour distinguer les cuvelages fixes des colonnes de production amovibles :

- cuvelage fixe : en anglais casing, en français tubage ou cuvelage ;
- tubing amovible : en anglais tubing, en français colonne amovible ou provisoire.

Un casing de production est à la fois un tubage technique répondant aux besoins de construction de l'ouvrage (protection et isolation vis-à-vis du milieu extérieur) et une conduite conduisant le fluide géothermal vers la surface. À ce titre, il subit à la fois des contraintes externes sur son extradors (pression lithostatique, agressivité chimique des terrains traversés) et, sur l'intradors, les contraintes apportées par le fluide transporté (chimie, variation de température, écoulement du fluide).

Il peut donc paraître séduisant, à l'intérieur du casing, de mettre en place un tubing amovible réservé à la seule production du fluide, tubing que l'on peut changer facilement en cas de nécessité. Néanmoins, en géothermie, à la différence de l'exploitation pétrolière, les débits d'exhaure sont importants et peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres cube par heure. Il faut donc prendre en considération les pertes de charge supplémentaires que va introduire la présence d'une colonne amovible d'un diamètre nécessairement inférieur au tubage dans laquelle elle sera installée.

Il y a donc des surcoûts à évaluer :

- surcoût d'achat du tubage amovible (particulièrement s'il est en composite) ;
- surcoût de mise en place et de l'installation de la colonne ;
- surcoût d'exploitation dû à l'augmentation des pertes de charges - ou surcoût de réalisation d'un forage de plus gros diamètre ;

- surcoût de manipulation de la colonne en cas d'intervention dans le puits avec des outils agressifs.

Les avantages que l'on peut trouver à installer un tubing en matériaux inertes sont principalement :

- pas de tube de traitement anti-corrosion à prévoir. Mais l'injection directe de produit inhibiteur par l'annulaire casing/tubing peut être envisagée ;
- durée de vie des ouvrages largement augmentée (sous réserve déjà mentionnée d'une meilleure connaissance de l'évolution réelle dans le temps des composites) ;
- possibilité de remettre un puits en état à moindre coût par changement de la colonne.

C'est l'appréciation technique et financière de ces avantages et de ces inconvénients qui permettra de choisir entre les deux options.

Mais pour pouvoir choisir en toute connaissance de cause, il faudrait néanmoins pouvoir évaluer le vieillissement réel des matériaux composites et pour cela définir des procédures de suivi permettant de vérifier et de quantifier avec précision l'évolution de l'état des matériaux composites dans le temps.

7. La cimentation des tubages

Une cimentation des tubages bien réalisée est une des conditions principales de la pérennité des ouvrages. Elle garantit en particulier l'étanchéité de l'ouvrage et protège l'extrados des tubages contre la corrosion. C'est enfin un critère important pour la sécurité des aquifères traversés par l'ouvrage et pour le contrôle de l'environnement des puits. On analysera dans ce chapitre les conditions requises pour obtenir une bonne cimentation, les moyens de contrôle disponibles et les remédiations envisageables en cas de difficultés :

- objectifs et contraintes des cimentations de tubage
- analyse des cimentations déjà réalisées ;
- choix des ciments et des procédures de cimentation ;
- choix du matériel de cimentation ;
- le centrage des tubages ;
- les mesures de vérification de la qualité des cimentations ;
- les différentes possibilités de remédiations.

7.1. OBJECTIFS ET CONTRAINTES

Les principaux objectifs d'une cimentation des tubages sont les suivants :

- maintenir les tubages en les fixant aux terrains traversés ;
- prendre en charge une partie des contraintes mécaniques supportées par les tubages : pression des formations, dilatation axiale et verticale due aux variations de température ;
- assurer l'étanchéité des annulaires, particulièrement au droit des nappes et empêcher des écoulements verticaux entre nappes ;
- protéger l'extrados des tubages contre les agressions chimiques facteurs de corrosion.

Pour atteindre ces objectifs, il faut réunir simultanément de nombreux éléments :

- obtenir la meilleure calibration possible du forage (qualité du forage) en évitant des variations de diamètre ou des ovalisations préjudiciables à la bonne mise en place du laitier ;
- disposer le long des parois d'un « cake » fin et étanche (rôle de la boue) permettant un bon contact entre ciment et terrain ;
- assurer un positionnement optimum du tubage au centre du forage (rôle du matériel de centrage) afin de déterminer un annulaire régulier ;

- fabriquer un laitier de ciment aux caractéristiques rhéologiques homogènes (qualité du déplacement et du remplissage) ;
- pomper ce laitier de façon régulière, sans à-coup (rôle du pompage, du spacer et des bouchons de séparation) afin de favoriser une mise en place optimum ;
- déterminer une attente de prise suffisante (W.O.C.) avant la reprise des travaux, afin de ne pas ébranler le tubage et garder un accrochage optimum du ciment sur le tubage (bonding).

La qualité de la **calibration du forage** est le premier élément conduisant au succès d'une cimentation. Il est clair qu'un forage mal calibré, présentant de fortes variations de diamètre (cavage) ou des effets d'ovalisation liés à une composition inadéquate du train de sonde ou au battement du train de tige (puits déviés), ne facilite ni la mise en place correcte du tubage au centre du forage, ni un déplacement du laitier optimum et régulier autour du tubage. Il faut donc s'assurer, dès la foration, que toutes les dispositions nécessaires pour assurer une calibration optimale de la géométrie trou foré sont prises.

Un log de diamètre (caliper) réalisé préalablement à la cimentation permet de préciser la géométrie du forage. Il permet également de calculer au mieux les volumes de laitier qu'il faudra mettre en place et peut fournir (en conjonction avec la géométrie de la trajectoire dans le cas d'un forage dévié) des indications précieuses pour aider au placement optimum du matériel de centrage.

Le rôle du **cake** est également à prendre en compte : il s'agit de bien mesurer le rôle prépondérant de la boue et de ses paramètres pendant la phase de foration avant la mise en place du tubage.

Le **centrage de la colonne** est d'une importance considérable. Ce point est malheureusement le plus souvent oublié par les opérateurs dans les forages verticaux et rarement correctement pris en compte dans les puits déviés.

On rappellera que :

- un forage dit vertical ne l'est jamais. Il a le plus souvent une allure hélicoïdale plus ou moins marquée, résultant de la rotation du train de tiges ;
- dans les puits volontairement déviés, il est rare que la trajectoire soit régulière et que l'inclinaison soit constante. En conséquence, les efforts mécaniques à prendre en compte pour maintenir le tubage au centre du forage dépendent non seulement du poids de la colonne, mais peuvent également varier fortement tout au long de la trajectoire en fonction des contraintes de courbure ;
- le diamètre réel du forage peut parfois varier par rapport à son diamètre nominal. Ces variations dépendent de nombreux paramètres. On citera en particulier : les paramètres appliqués pour la foration, le type et les paramètres rhéologiques des fluides de forage, la vitesse d'avancement, les caractéristiques mécaniques des formations traversées...

Il apparaît donc primordial de bien connaître la géométrie du forage (qu'il soit vertical ou dévié), afin de réaliser le placement optimum du matériel de centrage (type, positionnement et espacement des centreurs) afin d'assurer un annulaire aussi régulier que possible autour du tubage.

7.2. ANALYSE DES CIMENTATIONS RÉALISÉES

Environ 110 forages géothermiques ont été réalisés dans le Bassin parisien dans les années 1980, dont 66 sont toujours en exploitation.

Il est assez complexe et difficile de d'analyser l'ensemble des cimentations réalisées sur ces anciens forages. D'une façon générale, on retiendra :

- l'usage quasi général de ciment de type Portland classe A avec des laitiers de densité moyenne comprise entre 1,75 et 1,80 ;
- les tubages de production et d'injection (pour la grande majorité en diamètre 7") cimentés en mettant en œuvre des cimentations à deux ou trois étages : trois étages dont deux cimentés dans les puits de production, deux ou trois étages cimentés dans les puits d'injection ;
- la plupart des tubages techniques cimentés par injection classique par l'intérieur du tubage. Des cimentations par les tiges ont été réalisées, en particulier sur des tubages mixtes 13"3/8 x 9"5/8 et sur les tubages de gros diamètres (18"5/8) ;
- quelques rares essais ont été effectués avec des ciments allégés (pouzzolane, mousse).

Il y a peu d'évolution sur les nouveaux chantiers. Toutefois, une tendance semble voir le jour avec les éléments suivants :

- les forages sont le plus souvent réalisés en gros diamètre (9"5/8), ce qui conduit à des cimentations avec des volumes de laitier important exigeant des moyens adaptés ;
- le souhait d'éviter autant que possible la mise en place de raccord DV, particulièrement fragiles dans les puits déviés en gros diamètre, conduit à chercher à réaliser des cimentations en une seule phase avec des laitiers allégés.

Enfin, les outils de diagraphies concernant les cimentations mériteraient un développement et une meilleure adaptation aux besoins des forages géothermiques (gros diamètre, répétabilité).

7.3. CHOIX DES LAITIERS DE CIMENT

Le choix des ciments va dépendre de différents facteurs :

- les caractéristiques souhaitées : résistance mécanique, étanchéité, isolation thermique, résistance aux agressions chimiques ;
- les caractéristiques rhéologiques du laitier, en particulier sa densité ;
- la vitesse de prise du ciment.

Dans la plupart des cas, le choix du type de laitier est principalement fonction de la pression de fracturation des formations à cimenter (influant sur la densité du laitier), des volumes à fabriquer et à installer (moyens et coûts de mise en œuvre) et de la procédure de cimentation retenue (elle-même fonction des paramètres précédents).

De nombreux adjuvants sont possibles pour modifier une ou plusieurs des caractéristiques initiales d'un laitier de ciment.

Par exemple, un laitier standard de densité comprise entre 1,75 et 1,90 produit un ciment ayant une résistance mécanique adaptée à la cimentation de forages profonds. Mais cette densité peut être abaissée en utilisant des produits allégeant (pouzzolane, charge de microsphère de verre) ou des techniques particulières (produits moussants).

On peut également donner des propriétés « gonflantes » à un ciment en incluant un peu de bentonite dans le laitier (4 à 8 % en volume). Le ciment augmentera légèrement de volume en séchant, permettant un meilleur bonding au détriment toutefois d'une perte de la résistance mécanique.

Des accélérateurs ou retardateurs de prise pourront être ajoutés au laitier pour adapter les temps de prise aux besoins de la procédure de cimentation à réaliser.

En ce qui concerne la cimentation des forages géothermiques au Dogger, on retiendra que le choix des laitiers de ciment va varier en fonction du type de tubage à cimenter :

- pour les tubages techniques (en général jusqu'à 1 000 m de profondeur), le facteur principal sera les volumes à fabriquer ;
- pour les tubages de production installés au réservoir, il s'agira avant tout d'assurer une cimentation continue du tubage en évitant autant que possible l'utilisation des Diverting Valve (DV). Ce matériel est en effet peu fiable en raison de sa fragilité mécanique (c'est particulièrement vrai en puits dévié et en gros diamètre). Il a d'autre part l'inconvénient de créer une discontinuité hydraulique dans le tubage (ouverture de fenêtres vers l'annulaire plus ou moins bien refermées par la suite) et demeure un point sensible pour la corrosion (variation ponctuelle de la qualité des aciers).



DV et bouchons

L'utilisation de ciments allégés est une alternative intéressante pour s'affranchir de l'usage des DV. C'est une évolution observée sur les forages récents. Il reste néanmoins à s'assurer que les laitiers allégés assureront aux colonnes de production et d'injection une étanchéité et une protection comparable à celle des laitiers classiques. D'autre part, il n'est pas certain que certains de ces laitiers fournissent une réponse suffisante aux diagraphies soniques classiques (CBL) pour permettre d'évaluer la qualité de la cimentation. Il conviendra de proposer et mettre en

œuvre des moyens de contrôle adaptés au type de ciment utilisé afin de pouvoir vérifier la bonne réalisation des cimentations.

7.4. LES DIFFÉRENTES PROCÉDURES DE CIMENTATION

Plusieurs procédures de cimentation sont envisageables en fonction des conditions de réalisation du forage et de la structure du puits. Pour mémoire, on notera celles qui sont le plus classiquement utilisées en géothermie :

- les cimentations classiques par injection sous pression d'un laitier de ciment par l'intérieur du tubage, avec ou sans utilisation de bouchons de séparation ;
- les cimentations par les tiges (innerstring), similaire à la première, mais dans lesquelles l'injection du laitier est réalisée par l'intérieur d'un train de tiges descendu au sabot du tubage ;
- les cimentations étagées (deux ou trois étages), réalisées en plusieurs phases successives, avec utilisation de raccords à fenêtres (« Diverting Valve ») ;
- les cimentations complémentaires utilisées lorsque le laitier de la cimentation initiale n'est pas remonté dans l'annulaire jusqu'en surface. Du laitier est alors rajouté dans l'annulaire directement depuis la surface ou au moyen d'un tubing descendu dans l'espace annulaire.

Le choix de la procédure utilisée va fondamentalement dépendre du programme de tubage à réaliser. Par exemple, pour réaliser la cimentation d'une colonne monodiamètre, on choisira de préférence une procédure de cimentation classique ; pour la cimentation d'un tubage mixte 13"3/8 x 9"5/8, on pourra utiliser la procédure de cimentation par les tiges ; pour la cimentation d'une colonne dont la partie supérieure doit être ultérieurement retirée (cas fréquent pour libérer la chambre de pompage), on utilisera une cimentation étagée.

Globalement, quand plusieurs procédures sont envisageables, on peut considérer qu'il faut privilégier :

- celles qui permettent une cimentation en une seule phase (injection en continu de la totalité du volume de laitier) ;
- celles qui permettent d'éviter l'incorporation de matériel créant des discontinuités dans la colonne (cas des « Diverting Valve »). Ce matériel peut en effet ultérieurement être à l'origine de dégradations ponctuelles de l'étanchéité de la colonne (mauvaise fermeture des fenêtres) ou d'attaques corrosives préférentielles (composition différente des aciers).

À la fin de la procédure de cimentation, une attente de prise du ciment (WOC, Wait On Cement) doit être observée. La durée de cette attente dépend des caractéristiques du laitier fabriqué : elle est généralement de 48 heures. Durant cette attente, pour assurer la qualité de l'accrochage (bonding) du ciment sur l'acier du tubage, il faut éviter tout mouvement ou vibration de ce dernier. Il est donc recommandé de ne procéder à aucune opération impliquant le tubage pendant cette période. En particulier, la descente anticipée de la garniture de forage au sabot du tubage afin de gagner du

temps pour le reforage du matériel de cimentation devrait être prohibée. De même, le relâchage (décrochage) précoce de la suspension de la colonne, pour permettre la réinstallation du BOP par exemple, peut créer un micro annulaire sous l'effet de la reprise d'effort élastique de la colonne dans un laitier à prise incomplète.

7.5. LE MATÉRIEL DE CIMENTATION

Le matériel intégré à la colonne pour la réalisation des cimentations consiste, en allant du bas vers le haut, en :

- un sabot de cimentation vissé au bas de la colonne. Il sert de siège au(x) bouchon(s) en caoutchouc utilisé(s) pour l'injection et comporte le plus souvent un clapet anti-retour (une bille en bakélite). Pour les cimentations par les tiges, il est équipé d'un réceptacle de connexion pour recevoir l'extrémité des dites tiges. L'ensemble des éléments intérieurs fait de métal tendre, de ciment et de plastique est foré à la fin de l'opération ;
- tout au long de la colonne, à l'extrados, le matériel de grattage, de centrage, les paniers de retenue pour le ciment ;
- le ou les raccords de cimentation étagée (DV) lorsqu'une cimentation de ce type est envisagée. Il s'agit d'un raccord en acier incorporé par vissage dans la colonne à la profondeur souhaitée. Ce raccord comporte une chemise qui permet l'ouverture et la fermeture de fenêtres donnant accès à l'annulaire. Ce matériel permet de réaliser des cimentations en plusieurs étapes mais comporte trois inconvénients :
 - les chemises sont relativement fragiles et sensibles aux efforts mécaniques subis, en particulier aux effets du flambage dans les puits déviés. Ce qui entraîne parfois un mauvais fonctionnement du matériel,
 - les matériaux constituant le raccord sont pour partie d'un type d'acier différent de celui de la colonne où il est installé. Le raccord peut donc parfois être le siège ultérieur d'attaques de corrosion préférentielles (effet de piles) et de détériorations accentuées,
 - les fenêtres d'ouverture restent des points faibles dans la continuité hydraulique de la colonne et peuvent présenter un risque pour l'étanchéité du tubage pendant l'exploitation ;
- la tête d'injection (raccords et vannes) vissée sur le tubage (cimentation classique) ou sur les tiges (cimentation par les tiges). Ce matériel reçoit également les éventuels bouchons de cimentation séparant le laitier injecté des fluides utilisés pour le pousser. En fin de cimentation, les vannes sont fermées jusqu'à prise complète du ciment. Après la prise, la tête est retirée. Les bouchons en caoutchouc sont forés en même temps que le sabot.



Sabot de cimentation

7.6. LE MATÉRIEL DE CENTRAGE

Nous avons déjà vu précédemment que le centrage de la colonne est d'une importance considérable pour assurer une cimentation de bonne qualité (régularité de l'annulaire) et que ce point est rarement correctement évalué dans les puits.

Il est primordial de bien connaître la géométrie du forage (qu'il soit vertical ou dévié), afin de réaliser le placement optimum du matériel de centrage (type, positionnement et espacement des centreurs) et assurer de la sorte un annulaire aussi régulier que possible autour du tubage. La résistance à la compression des centreurs fournie par le constructeur permet alors de calculer leur espacement optimal en fonction de la trajectoire du puits et des efforts que cette trajectoire fait subir à la colonne.

Le programme de centrage, pour être efficace, devra être réévalué pour prendre en compte les contraintes de la trajectoire réelle du forage telle qu'elle sera enregistrée pendant les opérations de déviation.

Le matériel de centrage ou assimilé comporte :

- des gratteurs (bien que ce ne soit pas du matériel de centrage au sens strict du terme) ;
- des centreurs équipés de paniers anti-retour (basket) ;
- des centreurs simples à lames souples pour les annulaires ;
- des centreurs à lames semi-rigides pour les annulaires tubage-tubage ;
- des colliers de mise en place et de maintien.



Centreurs et colliers

Pour un meilleur rendement des centreurs souples et une plus grande liberté de compression, il est déconseillé de les installer à cheval sur les joints de tubage. On veillera également à espacer suffisamment les colliers de fixation pour permettre aux centreurs d'atteindre sans contrainte leur compression maximale.

On évitera également tout matériel de centrage ou de cimentation nécessitant une installation par soudure sur le tubage (la montée en température peut ponctuellement modifier la qualité de l'acier des tubages et provoquer des points de faiblesse mécanique et chimique dans la colonne).

Les centreurs et autre matériel disposé sur l'extrados de la colonne sont noyés dans le ciment : outre leur fonction de centrage, ils participent ainsi par « ferrailage » du ciment au renforcement de la résistance mécanique de l'annulaire et au maintien longitudinal du tubage.

7.7. VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ DES CIMENTATIONS

La vérification de la qualité de la cimentation s'effectue au moyen de mesures instantanées réalisées au cours des opérations de cimentation et de diagraphies différées spécifiques réalisées à posteriori.

L'arrêté préfectoral autorisant les travaux impose la mise en œuvre des contrôles nécessaires à une bonne cimentation.

Pendant la cimentation, les mesures (ou enregistrement) concernent :

- la densité du laitier de ciment ;
- la pression d'injection ;
- le débit d'injection ;
- le volume injecté.

Peu après la fin de la cimentation (24 heures), il est possible de réaliser une diagraphie thermique (log de température) dont l'interprétation permet de définir la présence de ciment derrière le tubage (réaction exothermique de la prise du ciment). Dans les cas où l'on n'observe pas comme prévu une remontée au jour du ciment, cette mesure permet de contrôler jusqu'à quelle profondeur le ciment est remonté dans l'annulaire.

Des diagraphies soniques de type CBL (Cement Bond Log) peuvent être exécutées ultérieurement dans les tubages. En mesurant la vitesse des ondes émises traversant le tubage, puis le ciment et enfin le terrain, elles permettent en particulier de mesurer la qualité de l'accrochage (bonding) du ciment sur l'acier et sur le terrain. Par analogie, elle donne la qualité du remplissage de l'annulaire par le ciment. Néanmoins, ces mesures ont une valeur toute relative et ne permettent pas de certifier le niveau de qualité de la cimentation. Les principales difficultés proviennent :

- des mesures de qualité médiocre dans les tubages de gros diamètre (13"3/8 et plus) ;
- des mesures inégales en puits dévié (effet du décentrage) ;
- d'une médiocre répétabilité des mesures (selon les appareils utilisés) ;
- des difficultés d'interprétation des mesures soniques dans un environnement aux interfaces difficilement différenciables (ciment / formations géologiques).

On constate à l'usage que si les CBL permettent d'avoir un aperçu général et intéressant du « bonding », ils ont peu de valeur quant il faut définir l'étanchéité réelle des annulaires. Il est souvent noté également que les données recueillies varient dans

le temps, mais aucune étude n'a encore été menée pour en définir les causes. On notera les interrogations suivantes :

- est-ce le simple effet de la mauvaise répétabilité des mesures ?
- est-ce l'effet de vieillissement de la qualité des matériaux ?
- ou bien est-ce l'effet du resserrement des formations argileuses sur l'annulaire ?

Ce dernier point met en évidence un éventuel effet positif du vieillissement sur la qualité de l'étanchéité verticale des annulaires, mais sans que l'on puisse réellement en mesurer la valeur.

De la même façon, des diagraphies différées ultrasoniques (ou imagerie ultrasonique) peuvent aussi être mises en œuvre. Ces techniques sont utilisées depuis une décennie environ pour certains ouvrages profonds de type pétrolier, en particulier ceux pour lesquels des garanties poussées d'étanchéité sont exigées, et ceux qui sont soumis à des cycles de variation de pression tels que les ouvrages de stockages de gaz souterrains. Le recours à ces outils de diagraphie spécifiques peut se justifier en géothermie lors d'opérations de cimentation allégée. Ces diagraphies sont nettement plus coûteuses que les diagraphies classiques, aussi doit-on prévoir leur budgétisation dès les phases d'avant projet lorsque des opérations de cimentation allégée sont envisagées.

7.8. REMÉDIATIONS

Réparer ou remettre en état une cimentation considérée comme incomplète ou défectueuse est une tâche difficile, souvent coûteuse, dont le résultat final peut parfois conduire à une situation pire que l'état initial. Il y a en effet très peu de solutions techniques permettant de remédier à un défaut de cimentation.

Dans le cas le plus simple, lorsque par exemple une cimentation apparaît incomplète et que le retour du laitier en surface n'a pas été observé, il est possible :

- de vérifier la profondeur réellement atteinte par le ciment au moyen d'une diagraphie thermique ;
- de réaliser une cimentation complémentaire par l'annulaire, soit en versant directement un laitier dense dans cet annulaire, soit en l'injectant sous pression au moyen d'un tubing descendu aussi bas que possible dans l'annulaire.

Dans le cas où une grande longueur de tubage n'a pas pu être cimentée correctement et qu'une cimentation complémentaire par l'annulaire ne peut être envisagée, la situation doit être évaluée en prenant en compte la mesure des effets que peuvent provoquer les travaux de remédiation sur la pérennité de l'ouvrage. C'est le cas parfois complexe où la cimentation initiale s'est mal déroulée (problème d'injection du laitier, de mauvais fonctionnement du matériel, de perte incontrôlée du laitier dans les formations...) entraînant l'absence de ciment sur une grande longueur de tubage.

En effet, dans la plupart des cas considérés, le seul moyen envisageable pour placer du ciment dans l'annulaire consiste :

- à perforer le tubage au moyen de charges creuses à la base du niveau que l'on souhaite cimenter ;
- puis à injecter sous pression du laitier par les perforations obtenues afin de le faire remonter dans l'annulaire.

On comprend aisément que perforer un tubage en tirant des charges creuses n'est pas sans effet sur la future tenue de ce tubage durant son exploitation (étanchéité, fragilité). Cette procédure devra donc de préférence être réservée à des tubages techniques qui ne seront pas ultérieurement en contact avec le fluide géothermal.

Dans chaque cas où un tubage de production sera concerné, l'analyse de la situation devra comparer les risques entre laisser le tubage en l'état et les conséquences que pourrait avoir une intervention.

Chaque cas étant particulier, une concertation avec l'ensemble des intervenants, responsables de projet, techniciens et autorités concernées, est un impératif pour analyser les suites à donner et définir les éventuelles mesures spécifiques qui pourraient être prises pour assurer la sécurité de l'ouvrage pendant son exploitation.

8. Essais de puits

8.1. OBJECTIFS

D'une manière générale, les « essais de puits » ont pour but de définir les capacités de production d'un puits, ainsi que les principaux paramètres hydrodynamiques du réservoir exploité.

Les paramètres acquis sur le Dogger lors des essais sont fondamentaux pour prévoir le comportement à court et long terme d'un puits ou d'un doublet (injecteur – producteur), ainsi que l'impact des ouvrages entre eux ou avec des exploitations voisines. En outre, la connaissance des paramètres du réservoir est indispensable pour pouvoir modéliser, optimiser et gérer l'exploitation de l'intégralité du réservoir du Dogger à l'échelle du bassin de Paris.

Le principe d'un essai de puits est de mesurer la pression du fluide en tête de puits ou au niveau du réservoir durant la mise en production (ou en injection) d'un puits ou durant un changement de débit. Le suivi de la pression durant la perturbation et/ou lors du retour à l'équilibre fournit les éléments de calcul des caractéristiques essentielles du réservoir dans un rayon plus ou moins grand autour du puits (fonction des volumes mis en jeu au cours du test). Pour cela, une mesure simultanée du débit, de la pression en fond et/ou en tête et de la température est nécessaire.

Deux catégories d'essais peuvent être distinguées :

- les essais de formation permettent plus spécifiquement de caractériser le réservoir (transmissivité proche et lointaine du réservoir...) et donnent des informations sur le puits (facteur de skin). Ils permettent également de caractériser la productivité des puits. Plus les volumes d'eau mobilisés durant ces essais seront conséquents, plus l'information recueillie caractérisera un volume important du réservoir ;
- les essais par paliers (dits de productivité ou d'injectivité) ont pour but de déterminer la courbe caractéristique du puits (courbe débit-pression) et l'indice de productivité ou d'injectivité de l'ouvrage à un moment donné.

On peut considérer que les essais de puits effectués en géothermie se situent entre le domaine pétrolier et l'hydrogéologie. Ils nécessitent un constant aller-retour entre les deux points de vue. Bien que les principes utilisés dans les deux domaines soient les mêmes, les contraintes et les finalités ne sont pas toujours concordantes. À l'heure actuelle, ce sont les appellations, les unités et la nomenclature pétrolières qui dominent dans les essais en géothermie profonde. Ce seront majoritairement celles utilisées ici.

Les principaux changements que l'on peut constater par rapport aux techniques employés dans les années 70-80 sont les suivants :

- une meilleure précision des mesures et une plus haute fréquence d'acquisition des données ;
- la possibilité, grâce à l'évolution des ordinateurs et des logiciels, de faire des interprétations graphiques extrêmement rapides et efficaces par superposition de modèle, ainsi que la capacité de simuler de nombreux modèles dans un délai très court ;
- l'utilisation de nouvelles techniques d'interprétation, appelées « techniques modernes d'interprétations de test » dans de nombreuses bibliographies, dont notamment la méthode de la dérivée de pression qui est devenue un outil usuel dans le domaine pétrolier.

8.2. QUELQUES DÉFINITIONS

• Perméabilité

Ce paramètre spatial correspond à l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression (naturel ou créé par un pompage ou une injection) dans une direction donnée. Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des caractéristiques physiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace, stratification, fracturation) et du fluide qui y circule (viscosité en fonction de la température et masse volumique). En géothermie, on s'intéresse surtout à la perméabilité horizontale.

• Transmissivité

La transmissivité est le produit de la perméabilité horizontale du milieu exploité par la hauteur productrice. Elle permet d'évaluer le débit que peut capter un forage pour une différence de pression donnée.

C'est le principal paramètre recherché pour caractériser les performances de l'aquifère.

• Facteur de skin

Cette valeur représente la perte (ou le gain) de productivité, par rapport au rayon réel du puits, provoqué par l'état (construction) de l'ouvrage, l'effet de son fonctionnement et le niveau de développement du réservoir à proximité immédiate du puits.

8.3. LES ESSAIS DE FORMATION

On appelle « essais de formation » les essais utilisant les phénomènes transitoires. L'appellation essais de formation est toutefois restrictive, car des informations sur le puits sont également acquises.

Le programme des essais doit être établi en prenant en compte les différentes contraintes de matériel, de coût et de disponibilité. Les essais de formation s'effectuant en fin du forage, l'optimisation de l'enchaînement des séquences et des durées de test

devra également tenir compte des coûts d'immobilisation de la machine de forage et du coût des mesures de pression (durée d'enregistrement de la pression en fond de forage).

8.3.1. Objectifs des essais de formation

Les essais de formation ont pour but d'acquérir les paramètres fondamentaux suivants :

- la transmissivité et la perméabilité (horizontale et éventuellement verticale) des niveaux producteurs ;
- les hétérogénéités du réservoir (variations dans les caractéristiques, effets éventuels de fractures, différences de niveaux producteurs...) ;
- les limites ou frontières éventuelles du réservoir ;
- la pression du réservoir, initiale et moyenne.

En plus des données concernant le réservoir, ces essais permettent de déterminer l'indice de productivité, le facteur de skin (représentatif de l'état du captage et du développement de l'ouvrage) et de caractériser les différents niveaux producteurs de la formation captée.

8.3.2. Principe

Le principe d'un essai de formation est de mesurer la perturbation de la pression du fluide entraînée par la mise en production du réservoir (pompage ou injection). Plusieurs phases peuvent être visualisées sur la réponse en pression :

- au début de la mise en production d'un puits, le débit soutiré correspond en partie au fluide présent dans le tubage du puits. La contribution du réservoir est alors minime. Un certain temps est nécessaire avant de pouvoir observer la mise en production effective du réservoir. Cette première phase correspond aux « effets de capacité de puits ». La pression enregistrée ne donne alors qu'une information sur la géométrie de l'ouvrage. Dans le cas de la géothermie, des phénomènes de compressibilité du fluide et de dégazage rendent d'ailleurs particulièrement difficile l'interprétation de cette partie de la courbe de pression ;
- quand le réservoir lui-même commence à produire, la pression dans celui-ci devient fonction du temps et de la distance au puits. La perturbation (cône de dépression) créé par la production va se propager dans le réservoir jusqu'à atteindre un régime permanent. La durée de cette phase dépend des paramètres du réservoir, notamment de la transmissivité. C'est grâce à cette phase que vont être déduits les différents paramètres hydrodynamiques du réservoir. En pratique, on n'atteint jamais le régime permanent ou pseudo permanent, la durée du test (en général une douzaine d'heures) étant toujours très inférieure au temps de stabilisation réelle.

L'interprétation se fait au moyen de modèles mathématiques reliant pression et débit. Différents paramètres et modèles sont testés jusqu'à obtention d'un comportement

similaire entre le modèle mathématique choisi et les pressions mesurées. La Figure 1 montre un exemple de superposition graphique entre des données réelles et le modèle mathématique.

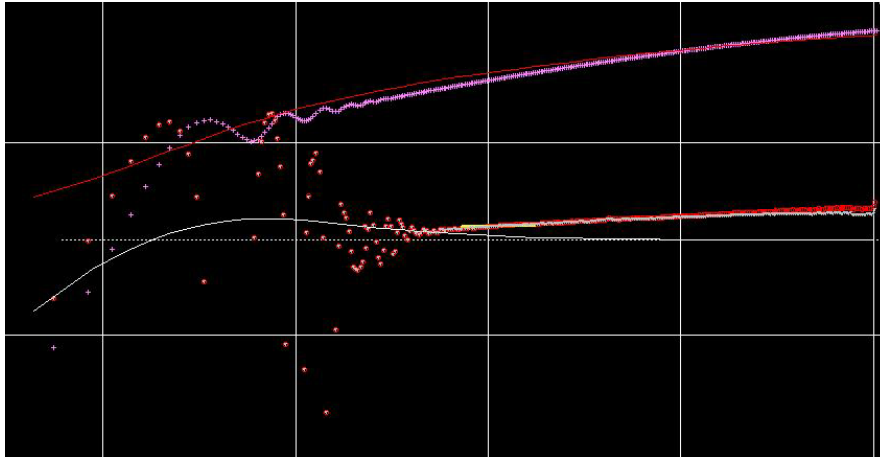


Figure 1 - Superposition des données et des modèles simulés (ici, pression et dérivé de pression vs log du temps, logiciel Saphir, Kappa engineering).

Des effets thermiques peuvent se superposer, notamment lors de l'injection d'un fluide plus froid que le fluide géothermique, pouvant rendre impossible l'interprétation par les outils usuels. Un minimum de stabilisation thermique doit alors être attendu (entre 8 et 12h).

8.3.3. Données nécessaires à l'interprétation d'un test

L'interprétation d'un essai nécessite la connaissance des paramètres suivants :

- le débit, la pression et la température, en fonction du temps, avec la séquence complète des différents événements et des problèmes rencontrés ;
- la géométrie du puits : rayon, profondeur et inclinaison ;
- les paramètres du fluide : compressibilité, viscosité, densité (valeurs pouvant être déduites de la salinité et de la température) ;
- les paramètres de réservoir : hauteur productrice et porosité.

Les paramètres de réservoir sont acquis lors de diagrapies :

- la hauteur et le débit des différents niveaux producteurs sont obtenus au moyen d'une flowmétrie et d'une thermométrie ;
- la porosité est calculée au moyen d'une diagrapie « neutron ».

Les paramètres du fluide sont acquis par les analyses chimiques et PVT (Pression-Volume-Température) et « Point de Bulle » effectuées par des prélèvements de fluide en tête et en fond de puits. On y ajoutera les données qui peuvent permettre de faciliter

l'interprétation d'un test, notamment les données géologiques et la connaissance régionale du réservoir.

8.3.4. Les différents essais de formation

De nombreux types d'essais existent en fonction des paramètres recherchés et du matériel utilisé. Les tests les plus utilisés sont les suivants.

- **Test de production (drawdown test)**

Le puits est mis en production et la baisse de pression est enregistrée (cf. Figure 2). Cela nécessite un débit constant. En pratique, il est souvent difficile d'obtenir un débit constant durant toute la période de l'essai et la pression enregistrée contient beaucoup de bruit de mesure.

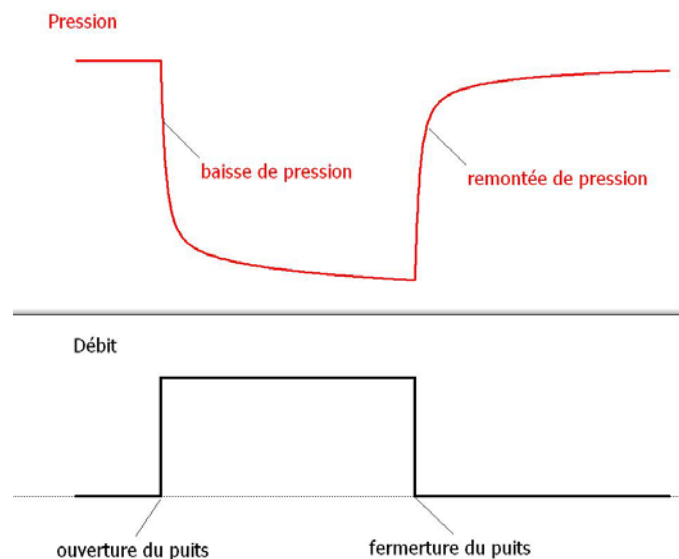


Figure 2 - Évolution de la pression au puits lors d'un essai de production et de remontée de pression.

- **Test de remontée de pression (build-up test)**

Dans ce test, c'est l'augmentation de la pression après fermeture du puits laissé en production un certain temps qui est utilisée (cf. Figure 2). La durée de la production doit être suffisante pour permettre de voir l'influence des paramètres du réservoir lors de la remontée de pression. Le temps de production doit être au minimum égal au temps de remontée de pression.

C'est actuellement le test principal utilisé pour l'acquisition des paramètres du réservoir sur le Dogger du Bassin parisien.

- **Test d'injection/arrêt injection (injection/fall-off test)**

Pour les puits injecteurs, un test d'injection est mené. Le principe est le même que pour un test de production ou une remontée de pression. La pression est mesurée durant l'injection ou l'arrêt de l'injection.

Les tests d'injections sont nécessaires pour vérifier la capacité d'injection du réservoir et sa symétrie (variabilité éventuelle entre capacité de production et capacité d'injection). En effet, il n'est pas toujours possible d'utiliser directement les résultats obtenus en production pour les extrapoler en injection.

• Test d'interférence

Ce test consiste à mesurer la réponse en pression occasionnée par la mise en production d'un puits sur un autre puits. Il a pour but principal de vérifier la connexion hydrodynamique entre les deux puits d'un doublet géothermique. Il peut aussi apporter des informations importantes sur la géométrie du réservoir et son hétérogénéité. Il s'agit actuellement du seul outil fournissant des informations sur les liaisons entre puits.

8.3.5. Durée d'un essai de formation

La durée d'un essai dépend essentiellement du rayon d'investigation, R_i , qui dépend lui-même des informations recherchées. Le rayon d'investigation est défini comme la distance minimum de réponse du réservoir au test (cf. Figure 3).

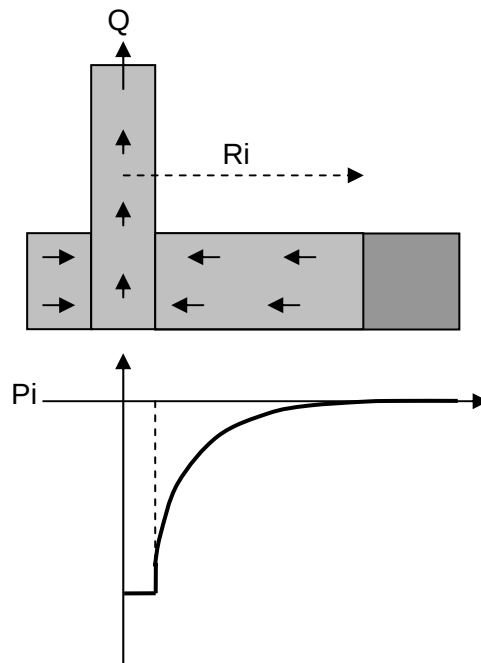


Figure 3 - Profil de pression au sein d'un aquifère et rayon d'investigation, P_i , pression initiale, R_i , rayon d'investigation, Q , débit.

Des hétérogénéités dans le réservoir peuvent produire des variations de transmissivité. Or le rayon d'investigation dépend directement de la durée de la mise en production du puits et des paramètres du réservoir. En effet, il est conditionné par la vitesse de propagation de la pression dans le milieu et est directement proportionnel à la racine carrée du temps de production (et de remontée de pression) et de la perméabilité du réservoir, k : $Ri \propto \sqrt{k\Delta t}$

Dans le cas du Bassin parisien, une durée de production de 10 à 12 heures, correspondant à un rayon d'investigation de 1 500 à 2 000 mètres, est couramment admise. Des fortes variations de transmissivité peuvent déjà apparaître à cette échelle. Pour comparaison, il est estimé que l'impact hydraulique d'un pompage peut, à long terme, se faire sentir jusqu'à 5 à 10 km.

8.4. LES ESSAIS PAR PALIERS OU ESSAIS DE PRODUCTIVITÉ ET D'INJECTIVITÉ

8.4.1. Objectifs

Les essais par paliers ont pour but de déterminer la courbe caractéristique du puits, c'est-à-dire la courbe reliant pression et débit. De cette courbe, sont déduits les indices de productivité et d'injectivité définis dans leur forme la plus simple par $I = \Delta P/Q$ avec Q le débit soutiré ou injecté et ΔP , la différence de pression occasionnée par le débit.

Ce type d'essai est effectué dans les cas suivants :

- évaluation rapide et sommaire des capacités de l'ouvrage après forage ;
- suivi de l'évolution des caractéristiques du puits au cours de son exploitation ;
- évaluation des effets d'une stimulation du puits (dans ce cas un essai est réalisé avant stimulation et un autre après stimulation pour comparaison).

8.4.2. Principe

Le principe de l'essai est d'effectuer plusieurs mesures de pression à des débits différents. Pour cela, plusieurs paliers de débit de production (ou d'injection) à débits constants sont enchaînés. Les pressions prises en compte sont celles mesurées en fin de chaque palier après stabilisation ou pseudo-stabilisation.

La courbe caractéristique est construite à partir des différents couples débit/pression. Elle montre généralement une première partie représentative des pertes de charges linéaires, puis une deuxième partie quadratique, représentative des écoulements turbulents apparaissant à forts débits.

La durée de chaque palier devra permettre une stabilisation suffisante de la pression. La durée nécessaire à cette stabilisation est fonction de la transmissivité du réservoir et peut nécessiter plusieurs heures à plusieurs jours. En pratique, la stabilisation

complète n'est pas véritablement attendue. Seule une pseudo-stabilisation est enregistrée.

Le nombre de paliers minimum admis pour construire la courbe caractéristique est généralement de trois. Les débits choisis doivent se situer dans la gamme des valeurs ou futures valeurs d'exploitation.

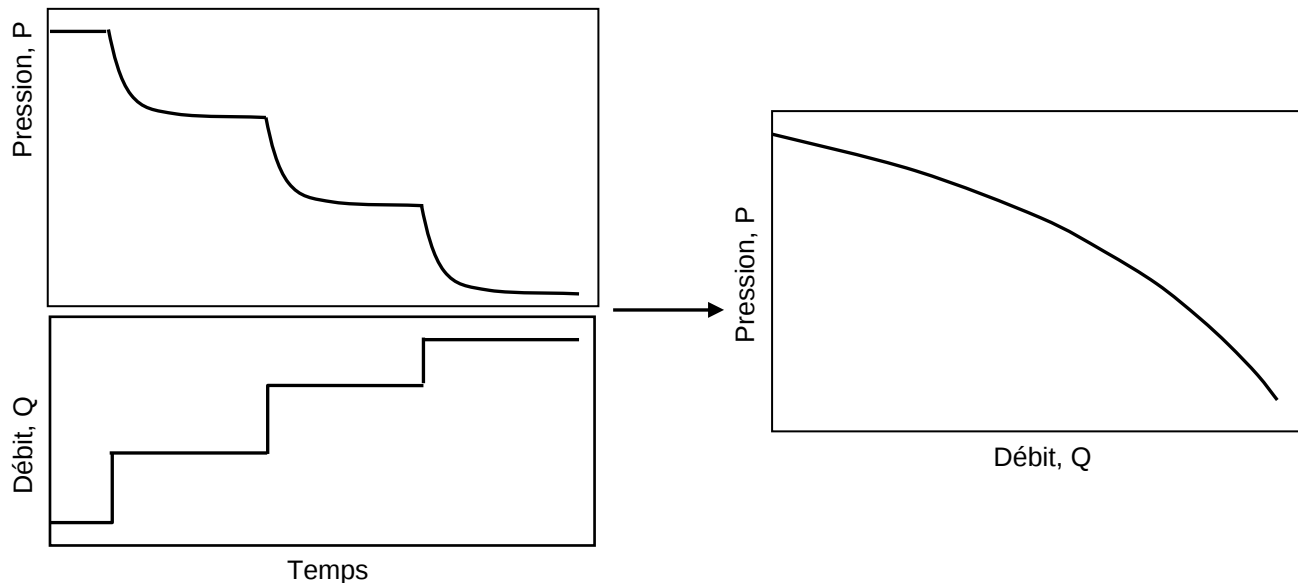


Figure 4 - Essais par paliers et courbes caractéristiques.

8.4.3. Équipements et acquisition des données

L'acquisition des données réclame une grande précision, notamment pour les tests de formation. Dans tous les cas, une acquisition en continue du débit, de la pression et de la température est nécessaire, ainsi que le relevé de toutes les perturbations remarquées sur chantier susceptibles d'avoir un impact (même de faible importance) sur la mesure et aidant à l'interprétation des données.

Il est recommandé de procéder à un étalonnage précis des capteurs avant de réaliser des essais.

- **Mesure de la pression**

Lors des essais de formation, la précision de la donnée impose des mesures de pression en fond de puits. En effet, en tête de puits, les effets thermiques (variations de densité de l'eau) et les pertes de charge dans le tubage sont trop importants et peuvent masquer les évolutions de pression recherchées.

La mesure de la pression en surface peut néanmoins se révéler suffisante pour les essais par paliers à condition d'utiliser des capteurs suffisamment précis. Une estimation des pertes de charges dans le puits doit alors être calculée.

• Mesure du débit

La mesure du débit nécessite la mise en place d'une « ligne d'essai ». Celle-ci relie la tête de puits et les lieux prévus pour recueillir le fluide géothermal en passant par le système de mesure du débit. La ligne d'essai entre la sortie du puits et le système de mesure doit minimiser les pertes de charge.

Une des méthodes les plus robustes est l'utilisation d'un bac déversoir, permettant de lire le débit à partir d'une hauteur de lame d'eau. On notera que quelque soit le moyen de mesure choisi, il doit pouvoir prendre en compte les effets de dégazage du fluide.

• Mesure de la température

L'acquisition en continue de la température, simultanément avec la pression, que ce soit en fond et/ou en tête, est nécessaire pour pouvoir évaluer les effets thermiques mis en jeux lors des différents essais.

• Prélèvements et analyses chimiques du fluide

Des prélèvements de fluide géothermal sont effectués durant les essais afin d'acquérir les paramètres physico-chimiques du fluide.

Ces prélèvements sont effectués en surface sur la ligne d'essai ou en fond de puits. Des analyses P-V-T, (permettant de relier la Pression, le Volume et la Température pour le fluide géothermal étudié), sont réalisées pour préciser la composition géochimique du fluide et son rôle dans la gestion future du réservoir.

Dans le cas du Bassin parisien, en plus des paramètres physico-chimique, la détermination de la teneur originelle en sulfures et en fer constitue un élément nécessaire pour appréhender en cours d'exploitation l'évolution des processus bactériens et les risque de corrosion/dépôt qui en découlent.

• Gestion du fluide géothermal en fin de forage

Une attention particulière devra être portée sur la nécessité de stocker des volumes importants de fluide géothermal lors des essais, avant sa réinjection dans un des puits ou son évacuation éventuelle dans les réseaux d'assainissement.

Dans ce dernier cas, une autorisation devra être obtenue auprès des services concernés. Cette autorisation précisera en particulier la température maximum de rejet du fluide géothermal et son pH.

Un seul essai de production ou de remontée de pression nécessite 12 heures de production de fluide géothermal à une moyenne de 100 m³/h. Les volumes des bassins devront donc être calculés en conséquence lors de la construction de la plateforme.

8.5. STIMULATIONS DU RÉSERVOIR

En fin de forage, une opération de stimulation du réservoir est opérée. Elle a pour objectif d'accroître les capacités de production du réservoir en provoquant une augmentation de la perméabilité du réservoir autour du puits. Elle contribue également au nettoyage du puits après forage.

Dans le Dogger du Bassin parisien, la méthode employée est la stimulation par acidification. D'autres méthodes existent (stimulation par fracturation hydraulique, stimulation par fracturation thermique) mais sont moins bien adaptées au réservoir carbonaté du Dogger. L'opération consiste à injecter des volumes d'acide qui interagissent chimiquement avec la formation calcaire et augmente la porosité naturelle autour du forage. Un gain de 30 % de débit est généralement observé après stimulation.

Dans le cas du Dogger du bassin de Paris, c'est de l'acide chlorydrique (HCl) qui est employé.

Entre deux et trois injections d'acide (dits « bouchons ») sont effectuées avec des volumes différents. Chaque bouchon est poussé dans la formation à une distance de plus en plus grande de manière à étendre l'action de l'acide. Un temps d'attente (généralement de l'ordre de 4 heures) entre chaque bouchon est nécessaire pour laisser l'acide réagir avec les formations. Les résultats de la réaction sont ensuite dégorgés en surface en mettant le puits en production.

On notera que la réaction de l'acide avec le réservoir crée des bouchons gazeux composés de CO_2 et d' H_2S . Ce phénomène implique la mise en œuvre de mesures de sécurité lors de la remise en production du puits. Le chantier devra donc disposer du matériel et des moyens nécessaires pour faire face :

- à la violence du dégazage qui doit être contrôlée (risque d'éruption), car elle peut devenir un danger pour le matériel et les personnes présentes sur le site ;
- aux gaz dégagés qui sont toxiques et nécessitent un contrôle et une gestion adaptée, particulièrement en milieu fortement urbanisé.

9. Têtes de puits

À l'issue des travaux de forage, les différents organes de sécurité nécessaires à la réalisation des puits sont enlevés et remplacés par une tête de puits définitive faisant jonction entre les parties des tubages en sous-sol et les conduites de surface acheminant le fluide géothermal vers ou en provenance de la centrale.

Les têtes de puits devront être protégées pour limiter leur exposition aux risques de détériorations naturelles (protection contre les intempéries, les écoulements de surface, la corrosion) ou accidentelles (restriction d'accès au site). Elles doivent d'autre part rester accessibles à des engins lourds pour des interventions ponctuelles ou périodiques de contrôle, de maintenance, d'entretien des puits ou pour réaliser les travaux d'abandon en fin de vie des ouvrages. Une surface d'au moins 1 000 m² devra être conservée autour de chaque tête de puits pour permettre ces différentes activités.

9.1. GÉNÉRALITÉS

Les têtes de puits de géothermie sont conçues selon les normes de l'API (American Petroleum Institute). Les pièces et robinetteries équipant les têtes de puits des forages au Dogger du Bassin parisien sont généralement des équipements de série 2 000 psi (140 kg/cm²) et 3 000 psi (210 kg/cm²).

Pour résister à la corrosion, les surfaces en contact avec le fluide géothermal sont kanigenées (nickel chimique 50 ou 75 µ) ou bien revêtu d'une résine type Halar[®].

Les raccordements entre les différentes pièces et robinetteries des têtes de puits sont réalisés par des brides à joints tores ovales munies de tiges filetées et d'écrous.

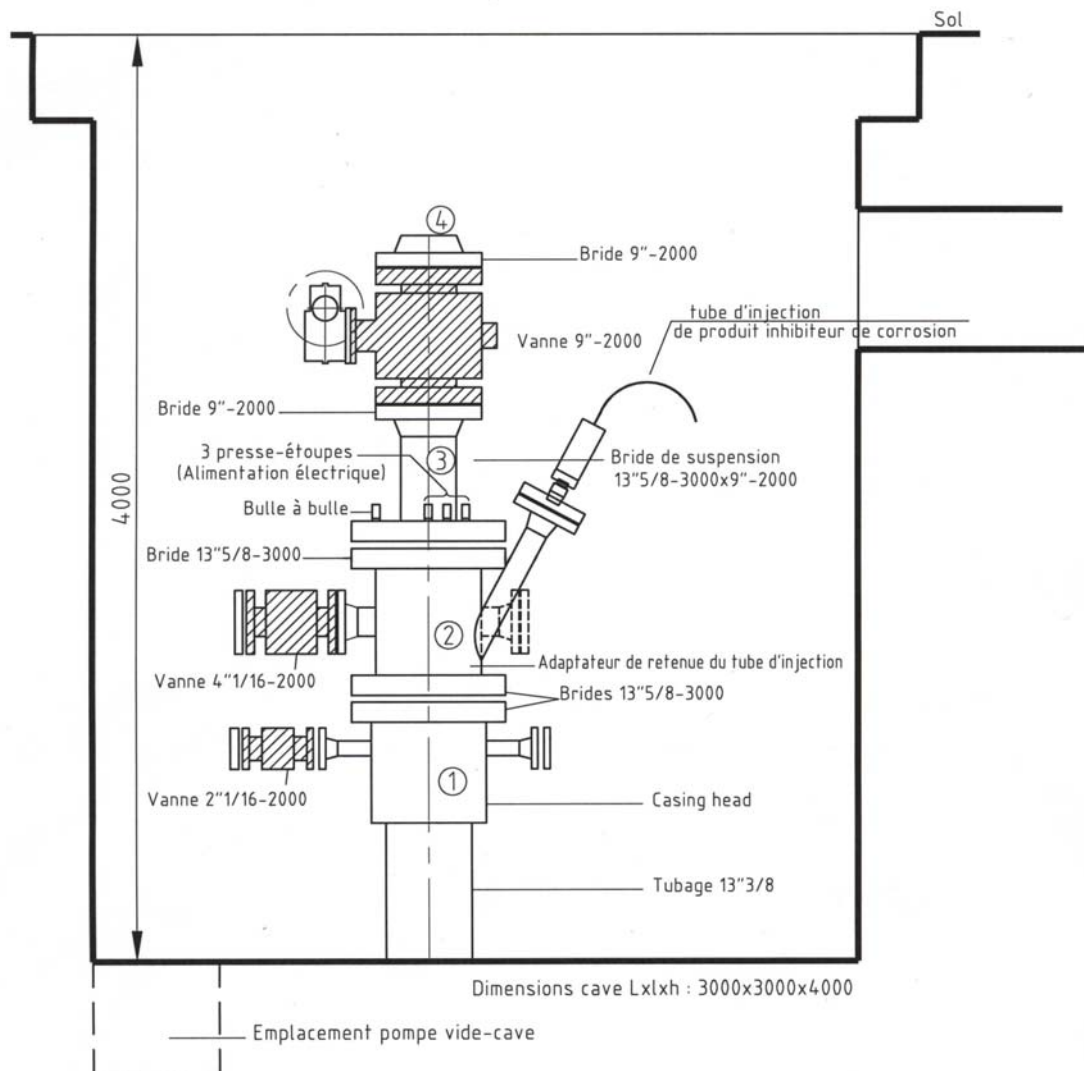
Une description des têtes de puits de production et d'injection est donnée ci-après. À partir du concept de base, les têtes de puits pourront toutefois présenter quelques variations en fonction des équipements installés dans le forage (pompes, systèmes de traitement, systèmes de mesures).

9.2. TÊTE DE Puits DE PRODUCTION

Une tête de puits de production (cf. figure ci-après) est composée principalement des pièces suivantes en partant du tubage du puits :

1. Un casing head (repère 1) permettant la jonction entre le tubage de production et les pièces de retenue des équipements immergés dans le puits.
Cette pièce est vissée (de préférence) ou soudée (dans ce cas, il faut prévoir des vérifications de qualité de la soudure) sur le tubage de production. Elle est munie en générale de deux sorties latérales à bride soudée 2"1/16 2 000 psi permettant la mesure de la pression dans le tubage ou bien la circulation des fluides nécessaire

aux opérations de maintenance du puits (neutralisation du puits par injection de saumure, circulation des fluides lors d'une opération de work-over).



A	13/02/09	MC.Brel	B. Herbrich	Mise à jour	C	Le :	E	Le :	
Ind.	Date	Dess.	Vérif.	B	Le :	D	Le :	F	Le :
ECHELLE :		Tête de puits de production							
 cfg services		Siège social : Avenue Claude Guillemin 45064 ORLEANS Tél. : 02 38 64 31 22 - Fax : 02 38 64 32 83							
Ce document est la propriété de cfg services. Reproduction interdite sans autorisation écrite				N° :					

2. Un adaptateur de retenue (repère 2) du dispositif d'injection d'inhibiteur de corrosion. Cette pièce permet le passage et le maintien du tube d'injection d'inhibiteur en fond de puits. Sa conception permet également d'extraire le groupe de pompage immergée sans relevage du tube de traitement. En outre, cette pièce est munie d'une sortie latérale équipée d'un robinet à tournant sphérique 4"1/16-2000 permettant également l'injection de saumure.
3. Une bride de retenue (repère 3) de la colonne d'exhaure. Cette pièce permet le vissage et le maintien de la colonne de production de la pompe d'exhaure. Elle est munie de trois presse étoupe étanche permettant le passage des trois brins du câble électrique d'alimentation du moteur immergée. Un robinet 1/2 " est monté sur la bride inférieure afin de raccorder le tubing de mesure du rabattement par injection d'azote (bulle à bulle).
4. Une vanne maîtresse 9"-2000 psi comprenant, un robinet à tournant sphérique, un réducteur et un servomoteur permettant de manœuvrer automatiquement et à distance l'ouverture ou la fermeture du robinet. Cette vanne constitue l'organe de sécurité de la tête de puits en cas de fuite sur les conduites de surface. Sur certaines têtes de puits, la vanne maîtresse motorisée est doublée d'une seconde vanne manuelle.

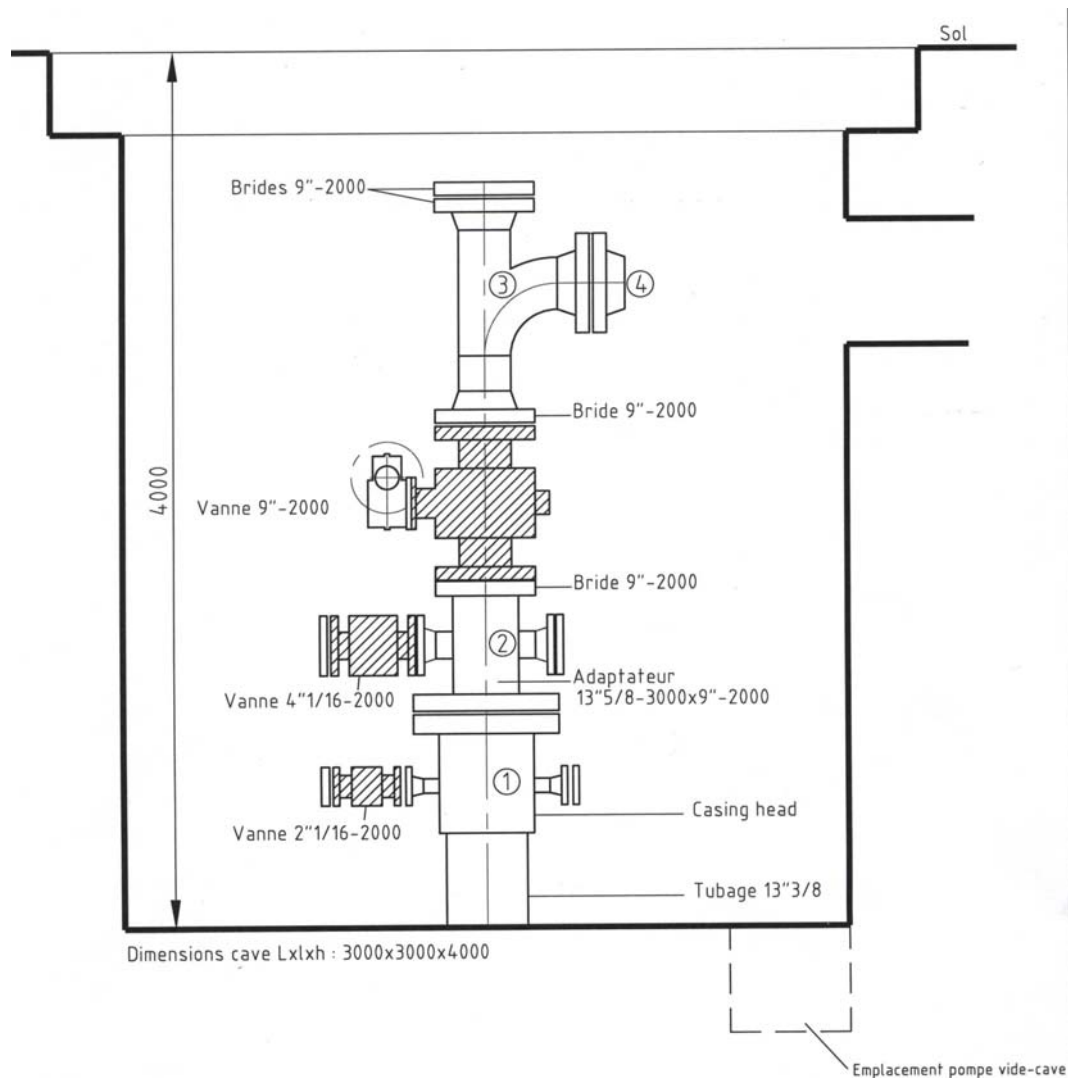
Enfin, une bride tournante (repère 4) vient se positionner au-dessus de la vanne maîtresse. Cette pièce permet de faciliter le raccordement avec les conduites de surface.

9.3. TÊTE DE Puits D'INJECTION

Une tête de puits d'injection (cf. figure ci-après) est composée principalement des pièces suivantes en partant du tubage du puits :

1. Un casing head (repère 1) permettant la jonction entre le tubage d'injection et l'adaptateur (repère 2).
La casing head est le plus souvent munie de deux sorties latérales à bride soudée 2"1/16-2000 permettant la mesure de la pression dans le tubage ou bien la circulation des fluides nécessaire aux opérations de maintenance du puits (neutralisation du puits par saumurage, circulation des fluides lors d'une opération de work-over).
2. Un adaptateur (repère 2) permettant la réduction du diamètre des brides. Cette pièce est munie d'une ou de deux sorties latérales dont l'une est équipée d'un robinet 4"1/16-2000 permettant également l'injection de saumure.
3. Une vanne maîtresse 9"-2000 comprenant, un robinet à tournant sphérique, un réducteur et un servomoteur permettant de manœuvrer automatiquement et à distance l'ouverture ou la fermeture du robinet. Cette vanne constitue l'organe de sécurité de la tête de puits en cas de fuite sur les conduites de surface. Sur certaines têtes de puits, la vanne maîtresse motorisée est doublée d'une seconde vanne manuelle.
4. Un té (repère 3) équipé de deux brides 9"-2000 psi. Cette pièce permet d'une part le raccordement latéral de la conduite de surface via la bride tournante (repère 4) et

d'autre part le passage vertical d'outils de diagraphie à travers un sas qui pourra être monté sur la bride supérieure.



A	13/02/09	MC.Brel	B. Herbrich	Mise à jour	C	Le :	E	Le :	
Ind.	Date	Dess.	Vérif.	B	Le :	D	Le :	F	Le :
Echelle :		Tête de puits d'injection							
		cfg services		Siège social : Avenue Claude Guillemin 45064 ORLEANS Tél. : 02 38 64 31 22 - Fax : 02 38 64 32 83					
Ce document est la propriété de cfg services. Reproduction interdite sans autorisation écrite.					N° :				

10. Mesures et contrôles en forage

La construction d'un forage profond est une opération technique dont la réalisation s'effectue quasiment « à l'aveugle » dans un environnement parfois difficile à évaluer avec précision et pouvant être très variable d'un site à l'autre. Il est donc important de pouvoir disposer au cours des travaux d'un maximum d'informations permettant de s'assurer de la conformité et de la bonne exécution de l'opération. Les principaux objectifs poursuivis sont :

- le suivi, le contrôle et l'analyse des travaux en cours ;
- l'optimisation des avancements ;
- une évaluation de la qualité du travail réalisé ;
- la prévention des risques au cours des travaux (risques pour l'ouvrage et risques pour l'environnement) ;
- le recueil, la connaissance et l'enregistrement des données géologiques ;
- une contribution à l'acquisition et à l'analyse des connaissances régionales sur la ressource géothermique et ses conditions d'accès.

Pour réaliser un ouvrage dans les meilleures conditions, il faut donc pouvoir acquérir, que ce soit en continu ou par enregistrements ponctuels, le plus de données possibles sur l'ouvrage, sa géométrie, les conditions de sa réalisation et son environnement géologique.

Les mesures et contrôles vont permettre de suivre et de diriger l'activité de forage, de s'assurer de la qualité des travaux et de recueillir toutes les informations essentielles pour une bonne réalisation des ouvrages et leur exploitation future. Ils s'agit donc d'un poste d'une importance cruciale qu'il ne faut surtout pas considérer comme négligeable ou secondaire lors de l'établissement du programme de forage.

10.1. PARAMÈTRES DE FORAGE

Les paramètres de forages correspondent à l'ensemble des données brutes mesurées en continu ou ponctuellement sur la machine de forage. Ces données sont généralement enregistrées par des systèmes d'acquisition et traitées en fonction des besoins.

Principaux paramètres concernant la foration :

- profondeur forée ;
- poids au crochet (donnant le poids sur l'outil) ;
- vitesse de rotation ;
- couple de rotation.

Paramètres concernant les fluides de forage :

- pression d'injection ;
- débit d'injection (généralement il est calculé en comptant le nombre de coups de pompe) ;
- niveaux des bacs ;
- qualité de la boue (densité, viscosité, filtrat...) : à part la densité, il s'agit le plus souvent de mesures ponctuelles.

Les mesures concernant le contrôle de la déviation. Ces mesures sont le plus souvent ponctuelles en raison du coût de mise en œuvre des systèmes de mesures permanents :

- profondeur de la mesure (fournie dans les paramètres de foration) ;
- inclinaison ;
- azimut ;
- calculs résultants : en particulier profondeur verticale (TVD), valeurs du déplacement (nord-sud et ouest-est), gradient d'inclinaison (DLS Dogleg Severity).

La valeur de DLS est un bon indicateur de la qualité et de la régularité de la trajectoire. Elle permet d'identifier des zones potentiellement génératrices de difficultés (par exemple lors de la descente du tubage) et joue un rôle prépondérant lorsque l'on cherche à optimiser le programme de centrage d'une colonne.

10.2. DIAGRAPHIES INSTANTANÉES

Les diagraphies instantanées correspondent au traitement, au fur et à mesure de la foration, des informations permettant de mieux évaluer les travaux.

Mesures et calculs concernant la foration :

- vitesses d'avancement (vitesse instantanée, vitesse moyenne).

Acquisition concernant la géologie à partir des déblais de forage (cuttings) :

- tracé de la coupe géologique en fonction de la profondeur (mud-logging).

Mesures et calculs concernant les fluides de forage :

- pertes et gains de volume dans les bassins. Ces données permettent d'évaluer les pertes et les venues de fluide dans le forage. Elles ont un rôle important dans la gestion des fluides de forage et pour la prévention des éruptions ou le contrôle des pertes.

Mesures de trajectométrie (déviation) :

- la profondeur verticale correspondant à la profondeur réelle forée ;
- le déplacement par rapport à la verticale ;

- l'évolution de la trajectoire en azimut par rapport à la cible ;
- les écarts par rapport à la trajectoire théorique ;
- éventuellement l'ellipsoïde d'incertitude de positionnement (dX,dY,dZ).

À ces données, on peut éventuellement rajouter les mesures de bruit qu'un chantier situé en zone urbaine dense peut être amené à réaliser à la demande des autorités ou pour les besoins du maître d'ouvrage.

10.3. DIAGRAPHIES DIFFÉRÉES

Les diagraphies différées sont l'ensemble des mesures effectuées à la fin du forage (ou à la fin d'une phase de la foration).

Dans la plupart des cas, il s'agit de l'enregistrement de diagraphies effectuées en trou nu dans le forage et dans le réservoir. Mais certaines diagraphies différées peuvent aussi être réalisées une fois que les tubages sont installés.

Les principales diagraphies en forage concernent :

- la géométrie du forage (diamètre ou caliper, trajectométrie) ;
- les caractéristiques géologiques des formations (électriques, gamma-ray, neutron, sonique) ;
- la qualité des cimentations (CBL-VDL et diagraphies d'imagerie ultrasonique) ;
- les logs de température ;
- les mesures hydrogéologiques (pression, débit, flowmétrie) ;
- les prélèvements de fond (bien que ne s'agissant pas à proprement parlé de diagraphies différées) pour les analyses physico-chimiques de l'eau géothermale et la détermination du point de bulle (PVT) ;
- les éventuelles diagraphies pouvant servir à la réception des ouvrages (PMIT, Casing collar locator CCL...).

Une partie des diagraphies différées peut être considérée comme faisant partie des diagraphies dites « de réception », car elles permettent de fournir au maître d'ouvrage les enregistrements prouvant la conformité de la réalisation avec les spécifications du marché et de l'autorisation de forage ainsi que la qualité de la mise en œuvre.

Certaines diagraphies représentent également un enregistrement de l'état initial des ouvrages avant leur mise en exploitation. Cet état initial constituera la référence pour les diagraphies périodiques de contrôle requises par la réglementation dans le programme de maintenance (diamètre multi bras, par exemple).

10.4. ÉVOLUTION ET PERSPECTIVES

L'évolution des mesures en forages concerne en particulier deux axes :

- une numérisation de plus en plus grande et un traitement informatique de plus en plus poussé des données, afin d'accéder plus facilement aux éléments permettant d'optimiser l'activité de forage, la maîtrise des coûts et la sécurité des opérations ;
- une extension et une amélioration progressive des possibilités des diagraphies différées, en particulier en ce qui concerne les critères de qualité et de répétabilité.

Quant aux perspectives les plus immédiates, elles seraient d'arriver à inciter les opérateurs à améliorer la qualité de certaines diagraphies différées ou à développer de nouveaux outils plus performants :

- obtenir de meilleures réponses (qualité, fiabilité, répétabilité) pour les diagraphies différées réalisées dans les forages en gros diamètres ;
- améliorer la qualité et la fiabilité des informations obtenues avec les diagraphies de cimentation et/ou développer de nouvelles technologies de mesures dans ce domaine.

11. Options de réhabilitation

Des opérations de réhabilitation des forages peuvent être engagées lorsque les puits arrivent en fin de vie ou que des anomalies sont constatées, soit par le fait d'un vieillissement progressif normal des ouvrages, soit lorsque des désordres sont observés en cours d'exploitation.

Les options disponibles pour réhabiliter les opérations géothermiques au Dogger varient en fonction du diagnostic de l'état des puits et des anomalies constatées :

- un curage des puits pourra s'imposer lorsque l'encrassement de surface des tubages entraîne des pertes de charge pénalisantes pour l'exploitation sans que l'état général de ces tubages soit remis en cause ;
- un rechemisage total ou partiel pourra être mis en œuvre lorsque le mauvais état du tubage ou la diminution notable de son épaisseur ne permet plus une exploitation dans des conditions de sécurité suffisantes (perte d'étanchéité, trop faible épaisseur résiduelle de matière pouvant mener à des risques d'écrasement du tubage, dégradation générale trop importante de l'acier) ;
- lorsqu'une remise en état n'est pas envisageable, un abandon des puits (abandon qui peut être définitif ou provisoire dans l'attente d'une solution future) devra être envisagé avec pour objectif la mise en sécurité de l'ouvrage et de son environnement ;
- la réalisation de forages de remplacement pourra également être envisagée, soit par la création d'un nouveau doublet, soit par la création d'un triplet (un forage neuf venant alors compléter, généralement pour la production, un couple de forages anciens réhabilités désormais dédiés à la réinjection) ;

La réalisation de nouveaux forages est soumise à autorisation préfectorale. Les opérations de réhabilitation ou d'abandon des puits doivent respecter les dispositions de l'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation du gîte. Il convient dans tous les cas d'informer la DRIRE préalablement à toute intervention importante sur la boucle géothermale ou sur les puits.

11.1. LE DIAGNOSTIC

La décision conduisant à réhabiliter les forages d'un doublet provient soit des résultats des mesures réalisées lors d'un contrôle réglementaire périodique, soit de l'observation de désordres perturbant de façon importante l'exploitation du site.

Le premier travail à réaliser à la suite des constatations initiales consiste à réaliser un diagnostic détaillé de l'état des ouvrages, afin d'analyser au mieux leur degré de détérioration et de déterminer les remédiations envisageables. Les auscultations pourront en particulier porter sur les éléments suivants :

- une analyse des paramètres de l'exploitation (évolution des débits et des pressions dans le temps) ;
- une vérification de l'état des échangeurs et du matériel annexe de surface (filtres, vannes) ;
- une vérification de la canalisation constituant le réseau primaire ;
- les têtes de puits : vérification de l'état des vannes, de leur fonctionnement et de leur étanchéité ;
- les tubages : vérification de l'état de la surface intérieure des tubages de production (encrassement, corrosion, percement) et de leur étanchéité. Cette vérification se fait à la fois par l'auscultation des coupons témoins de corrosion placés en surface dans le réseau primaire (en général à la sortie du puits de production), par la réalisation de diagraphies spécifiques (diamètre multi-bras) et par d'éventuels tests d'étanchéité ;
- vérification de l'évolution des cimentations (étanchéité verticale entre aquifères, protection de l'extrados des tubages). L'évolution de l'état des cimentations peut se faire au moyen de diagraphies spécifiques (sonique) et plus difficilement par observation de l'étanchéité des annulaires (test de pression entre packer). La mesure de la qualité d'une cimentation reste toutefois d'une approche difficile compte tenu du manque de précision et de répétabilité des outils et de la difficulté d'interprétation des données en termes d'épaisseur ou d'étanchéité. La mesure donne avant tout une valeur moyenne de l'accrochage (« bonding ») du ciment sur le tubage sans nécessairement permettre de connaître son épaisseur ou sa cohésion réelle ;
- le réservoir : il s'agit de contrôler le remplissage éventuel du réservoir par des matériaux (il s'agit d'une simple mesure de la profondeur) et si nécessaire de l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques des puits de production et de réinjection (tests de production).

11.2. LE CURAGE

Lorsque le diagnostic démontrera un encrassement important des tubages (il s'agit généralement de dépôts de sulfure de fer provenant d'une attaque corrosive de l'acier), il faudra envisager un curage des puits afin d'éliminer ces dépôts.

Il s'agit de travaux relativement lourds nécessitant l'installation d'une machine de servicing capable de descendre un outil en fond de puits. Ce travail est effectué par nettoyage mécanique et hydraulique. Le tubage est nettoyé sous pression au moyen d'un outil de jetting descendu à l'intérieur du tubage. Il est complété par un nettoyage du réservoir et de la « poubelle », afin d'éliminer tous les résidus solides.

À l'issue des travaux de curage, des diagraphies (outils de diamètre multi-bras) permettront de contrôler l'épaisseur du tubage résiduel. Selon les résultats obtenus :

- le puits est considéré comme pouvant être remis en service en l'état ;

- le tubage n'est plus utilisable (épaisseur résiduelle trop faible, perforations observées ou soupçonnées) et le puits devra alors être soit rechemisé soit abandonné.

11.3. LE RECHEMISAGE

Rechemiser un puits consiste à installer une nouvelle colonne de production à l'intérieur du puits. Cette opération peut se faire :

- soit par remplacement d'un ancien tubage amovible ;
- soit en introduisant un nouveau tubage (amovible ou non) à l'intérieur de l'ancien.

Dans le premier cas, il s'agit du simple remplacement de l'ancien tubage usagé (qui sera ressorti du puits) par un tubage neuf. Dans le deuxième cas, il y a nécessairement une perte de diamètre puisque l'on introduit le nouveau tubage à l'intérieur de l'ancien. Dans chaque cas, les nouvelles colonnes installées peuvent être fixes (c'est-à-dire cimentées après leur pose) ou amovibles, en acier ou en matériaux composites.

Sauf dans le cas particulier d'un ouvrage qui apparaîtrait en très mauvais état, c'est-à-dire dont la résistance mécanique de la colonne en place serait notoirement insuffisante ou dont le tubage montrerait des risques potentiels de percement, on peut considérer qu'il est préférable de réaliser le rechemisage avec une colonne amovible.

On notera que le rechemisage d'un puits réalisé en télescopant un nouveau tubage à l'intérieur du premier entraîne obligatoirement une forte augmentation des pertes de charge en exploitation du fait de la réduction conséquente du diamètre de la colonne de production. D'où la tendance qui voit le jour, pour les doublets réhabilités par rechemisage, de réaliser un triplet : un nouveau forage, en général celui d'exhaure, en gros diamètre vient alors s'associer aux deux anciens puits rechemisés de plus faible diamètre (jusqu'à 5") qui sont utilisés conjointement pour la réinjection, divisant par deux les débits unitaires et limitant ainsi les pertes de charge dans ces forages de petits diamètres.

11.4. L'ABANDON DES PUIITS

La procédure d'abandon survient généralement après un diagnostic ayant démontré le mauvais état général de l'ouvrage. Le maître d'ouvrage peut alors décider soit d'arrêter définitivement la production géothermique, soit de la suspendre en attendant une décision de travaux futurs. Dans ces deux cas, les puits sont abandonnés en appliquant les règles de l'art en la matière. Les objectifs poursuivis sont la mise en sécurité de l'ouvrage, en particulier sur les points suivants :

- mise en sécurité ciblée des zones du forage dont le diagnostic a montré une détérioration importante. Des bouchons de ciment spécifiques pourront être installés au droit de ces zones ;
- protection des sabots des tubages et des zones de raccordement ou de télescopage entre tubages ;

- protection des aquifères traversés par le forage, en particulier de celui de l'Albien-Néocomien qui est une réserve stratégique protégée d'eau potable pour la région parisienne. Le programme de rebouchage des puits est établi de façon que ces zones soient rendues étanches à une invasion par des fluides géothermaux ;
- mise en sécurité du puits vis-à-vis des risques de fuite de fluides géothermaux (de l'intérieur vers l'extérieur du puits) ou de contamination des nappes (de l'extérieur vers l'intérieur ou entre nappes). Il s'agira d'assurer par un rebouchage adéquat (bouchons étanches résistants aux pressions) que les fluides géothermaux ne puissent circuler ni à l'intérieur du puits ni dans les annulaires. De la même façon, on s'assurera que les eaux de surface (ruissellement, inondation) ne puissent pénétrer à l'intérieur de l'ouvrage ou par les annulaires depuis la surface.

11.5. DOUBLET OU TRIPLET

Nous avons vu dans le paragraphe concernant le rechemisage qu'une évolution actuellement observée sur les projets de réhabilitation est de transformer les doublets en triplets. Cette évolution répond au souci de conserver des conditions d'exploitation acceptables après une réhabilitation ayant conduit à la réhabilitation et/ou au rechemisage des puits, c'est-à-dire de minimiser au mieux les pertes de charges en exploitation. La réalisation d'un triplet s'effectue généralement de la manière suivante :

- les deux anciens puits réhabilités sont rechemisés en installant un nouveau tubage à l'intérieur du premier (en 5" pour les puits initialement équipés en 7", en 7" pour ceux initialement équipés en 9"5/8), ce qui induit une perte de diamètre conséquente par rapport au puits d'origine ;
- un nouveau puits est réalisé en gros diamètre (tubage de production 9"5/8) à partir de la même plateforme. Il s'agit en général du nouveau puits de production ;
- le triplet est mis en fonctionnement avec le nouveau forage servant de puits de production et en répartissant le débit de réinjection entre les deux anciens forages en petit diamètre afin de minimiser les pertes de charge.

Les pertes de charge peuvent néanmoins s'avérer très importantes dans le cas d'un rechemisage en petit diamètre.

Exemple : dans le cas d'un doublet avec une production de 300 m³/h et comportant :

- ancien puits de production : 1 400 m de tubage 7" et 400 m de tubage 13"3/8 ;
- ancien puits d'injection : 1 800 m de tubage 7" ;
- nouveau puits de production : 1 400 m de 9"5/8 et 400 m de 13"3/8.

	Doublet	Triplet 7"	Triplet 5"
Tubage 5" injection			22,1 kg/cm ² 22,1 kg/cm ²
Tubage 7" production Tubage 7" Injection	11,0 kg/cm ² 14,1 kg/cm ²	- 3,6 kg/cm ² 3,6 kg/cm ²	
Tubage 9"5/8 production		2,9 kg/cm ²	2,9 kg/cm ²
Tubage 13"3/8 production	0,1 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²
TOTAL	25,2 kg/cm²	10,2 kg/cm²	47,2 kg/cm²

D'autre part, les conséquences sur la ressource doivent être évaluées avec soin. En effet, la création d'une deuxième bulle froide (la bulle du puits de réinjection et la nouvelle bulle de l'ex-puits de production reconverti en puits de réinjection) peut être dommageable tant pour la pérennité de la ressource du projet lui-même (temps de percement du front froid au puits de production) que pour la gestion générale de la ressource disponible dans l'environnement du projet (agrandissement de zone affectée par l'exploitation du projet). Une modélisation de ces modifications est impérative pour définir la géométrie optimale d'implantation des nouveaux ouvrages.

Outre les conséquences financières que le choix aura sur le projet, les conséquences sur la ressource de la modification des conditions d'exploitation devront donc être évaluées. Il s'agira donc de comparer l'impact de la nouvelle réalisation par rapport aux effets respectifs :

- de l'ancien doublet ;
- de la construction d'un doublet entièrement nouveau ;
- des modifications que va apporter la création du triplet ;
- de l'impact que cette modification pourra avoir sur les projets voisins (actuels ou potentiels) et sur les développements futurs de la géothermie dans le secteur considéré.

12. Ingénierie de forage

12.1. LA PRÉPARATION D'UN PROJET GÉOTHERMIQUE

Le schéma ci-dessous présente, d'une manière simplifiée, l'organisation d'un projet de géothermie.

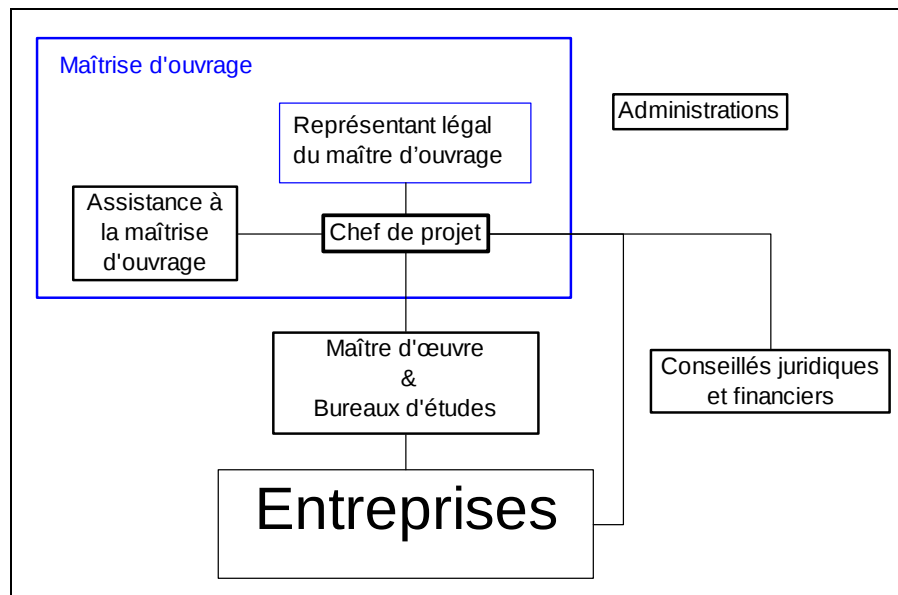


Figure 5 - Schéma simplifié de l'organisation d'un projet de géothermie.

Les maîtres d'ouvrages sont soit des collectivités locales ou leurs émanations, soit des entreprises d'exploitation de chauffage.

Dans les deux cas, la réalisation d'une opération de géothermie profonde est une opération rare : les équipes du maître d'ouvrage en charge du suivi n'auront que très rarement l'occasion de réaliser plus d'une opération dans leurs carrières.

En ce qui concerne les chauffagistes, rompus à l'exploitation des installations de surface, ils se trouvent dans la même situation, pour la réalisation des ouvrages en sous-sol, que les services techniques des collectivités.

Le chef de projet est désigné officiellement par le maître d'ouvrage, il le représente dans les limites des délégations qui lui sont données. Il constitue un pouvoir décisionnel intermédiaire. Présent tout au long du déroulement du projet, c'est le lien avec les instances de validation.

Les opérations géothermiques sont donc nécessairement encadrées par une structure pluridisciplinaire.

12.1.1. L'assistance à la maîtrise d'ouvrage

L'Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) est un professionnel du management des projets géothermiques ; à l'écoute de tous, il est dans une position techniquement neutre. Il est également rompu aux techniques de planification et doté de capacités d'écoute, de communication, d'animation, d'observation, d'analyse et de synthèse.

L'ensemble constitué par le représentant légal du maître d'ouvrage, le chef de projet et l'AMO constitue la maîtrise d'ouvrage.

Le recours à l'Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) se justifie par le caractère complexe et inhabituel des opérations de géothermie profonde. L'AMO est un sachant qui a pour mission de défendre les intérêts du maître d'ouvrages, c'est-à-dire la réalisation, dans le respect des délais, d'un ouvrage sûr, pérenne et au meilleur coût.

Les tâches de l'AMO portent sur l'accompagnement de la mise en place des différents contrats administratifs, techniques, financiers et de couverture du risque spécifique à la géothermie.

Le diagnostic doit explorer une gamme de solutions aussi large possible. C'est typiquement le domaine d'intervention de l'AMO.

Différentes responsabilités peuvent être assurées par l'AMO, depuis le simple conseil ponctuel, jusqu'à la maîtrise d'ouvrages déléguée.

12.1.2. Les contrats d'études

On distingue traditionnellement les études techniques, qui concernent la définition et le calcul des ouvrages, de l'ingénierie financière, qui vise à évaluer leur rentabilité et à définir leur financement.

Seuls les contrats techniques sont considérés dans le présent document.

Dans un premier temps, les études visent à orienter le choix du maître d'ouvrages vers la meilleure solution technique et économique répondant à son problème énergétique.

Ensuite, la solution technique étant choisie, dans notre cas la réalisation d'une opération de géothermie profonde, les études visent à en rechercher toutes les contraintes administratives et réglementaires, ainsi que les caractéristiques techniques principales. Il est nécessaire, à ce niveau, de faire appel à des spécialistes.

Enfin, le dernier niveau d'étude concerne la définition détaillée des ouvrages, les calculs techniques nécessaires à leur réalisation par les entreprises, le planning prévisionnel, le calcul d'un coût d'objectif et la fourniture des informations nécessaires à l'obtention des autorisations administratives, des aides et des soutiens spécifiques.

S'agissant de réalisations dont la partie sous-sol est fondamentale, un soin particulier doit être apporté à la géologie prévisionnelle et à son incidence sur le déroulement du programme.

Pour les opérations au Dogger, il faut en effet tenir compte du fait que la plupart des forages sont déviés, alors que les séparations des différentes couches géologiques sont des surfaces gauches. Il est donc nécessaire de faire appel à des extrapolations pour connaître au mieux la géologie en tout point de la trajectoire des forages.

12.2. LES CONTRATS DE RÉALISATION

12.2.1. Le contrat de maîtrise d'œuvres

Le maître d'œuvres, qu'il ait ou non réalisé les études préalables, a la charge d'accepter les études en question et de procéder à la réalisation du programme. Il peut, le cas échéant, proposer des aménagements du programme.

Pour cela, il a la responsabilité de tout ou partie des tâches suivantes :

- rédaction des éléments techniques des appels d'offre de sélection des entreprises ;
- participation à la sélection des entreprises ;
- contrôle de réalisation ;
- rédaction des documents liés aux ouvrages.

Il faut noter que la nature et l'étendue des tâches du maître d'œuvres dépendent également de la nature des contrats passés entre le maître d'ouvrages et les entreprises et, principalement, avec l'entreprise de forage.

12.2.2. Le contrat de supervision de forage

La supervision de forage porte sur le respect des spécifications techniques et sur le contrôle des adaptations du programme en fonction des données géologiques réellement constatées sur le chantier. Son objectif est d'éviter la survenue de malfaçons susceptibles, d'une part, de nuire à la qualité des ouvrages et, d'autre part, d'être la source de contentieux futurs.

Deux cas très différents se présentent :

- dans le cas d'un **contrat au forfait** (ou au mètre), pris par l'entreprise de forage, le maître d'œuvres peut être titulaire d'un contrat de supervision de forage, afin de réaliser un contrôle de réalisation pour le compte du maître d'ouvrage. C'est le schéma mis en place lors de la réalisation du doublet de l'Opac du Val-de-Marne à Orly ;
- dans le cas d'un **contrat en régie**, le maître d'œuvres est responsable du pilotage du forage pour le compte du maître de l'ouvrage. Ce fut le cas pour la plupart des opérations réalisées dans le Bassin parisien dans les années 1980, ainsi que pour

les forages scientifiques de Soultz-sous-Forêt et les forages de recherche pour le stockage des déchets radioactifs de l'ANDRA. Le superviseur de forage peut également dans ce cas être une personne tierce, compétente, présentant une garantie d'indépendance vis-à-vis du maître d'œuvre et du foreur.

12.2.3. Les contrats de suivi des installations

En ce qui concerne les installations de surface, il s'agit du suivi, imposé par la DRIRE, de l'origine des fournitures de chaleur au chauffage urbain, entre la géothermie et l'appoint thermique. À cela, peuvent s'ajouter des suivis ou des contrôles des contrats d'exploitation du réseau de chaleur quelle qu'en soit la nature (exploitation, affermage, concession).

Pour les aspects sous-sol, il s'agit du suivi chimique et des diagraphies périodiques imposés par la réglementation. À ces aspects administratifs, peuvent s'ajouter des contrats de garantie de tout ou partie des éléments de la boucle géothermale (pompe immergée).

12.3. LES CONTRATS DE FORAGE AU FORFAIT

12.3.1. Description

Dans le forage au forfait intégral, l'entreprise responsable du forage s'engage à réaliser un ouvrage, clef en main, conforme aux spécifications techniques du maître d'œuvres qu'elle a approuvé au préalable.

Les rémunérations sont fixes et non révisables, quels que soient les aléas rencontrés en cours de chantier.

Des pénalités pour retard ou des bonus pour réalisation plus rapide peuvent néanmoins être négociés.

12.3.2. Conditions d'application

Ce type de contrat est adapté à des réalisations pour lesquelles l'aléa est faible sinon maîtrisé.

Ce peut être le cas pour les opérations au Dogger en Île-de-France, avec deux bémols toutefois liés :

- à la nécessité pour l'entreprise de forage d'avoir une solide expérience du forage dans la région considérée. De ce fait, on notera que, dans le cas d'entreprises ne connaissant pas la géologie de l'Île-de-France, les entreprises étrangères notamment, le contrat au forfait ne paraît pas réaliste ;
- au fonctionnement des entreprises de forage pétrolier, peu habituées à intervenir au forfait et à piloter l'ensemble des intervenants, et mal préparées à des

responsabilités dont elles n'ont pas nécessairement les compétences et qu'elles n'ont traditionnellement pas l'habitude d'assumer.

12.3.3. Position de la maîtrise d'ouvrage

Dans le contrat au forfait, la maîtrise d'ouvrage a une vision claire du coût de l'ouvrage. Mais deux incertitudes majeures subsistent concernant la qualité de l'ouvrage et les délais de réalisation.

Pour se prémunir contre les malfaçons, le maître d'ouvrage peut recourir à un contrat de supervision de forage. Il contracte alors avec une entreprise chargée, en continue, de contrôler la conformité et la qualité de la réalisation. Dans le cas d'un contrat au forfait, le superviseur ne peut toutefois intervenir que sur les moyens et méthodes mis en œuvre par le foreur par rapport au programme prévisionnel. En fonction de l'évolution des travaux, de conditions géologiques particulières ou de problèmes techniques rencontrés pendant la foration, il peut proposer mais ne peut pas imposer de décisions à l'entreprise de forage.

En ce qui concerne les délais, les foreurs n'acceptent généralement pas de pénalité de retard, estimant que les coûts journaliers en forage, de 25 k€ à 35 k€, sont déjà suffisamment pénalisants.

Le contrat au forfait minimise le niveau de compétence du maître d'ouvrage.

12.3.4. Position du titulaire du marché de forage

Deux cas de figure sont envisageables, selon que le titulaire est l'entreprise de forage ou le maître d'œuvre (cas de figure déjà rencontré dans le passé).

Si le titulaire est l'entreprise de forage, elle doit se doter en interne des compétences nécessaires pour le suivi et le pilotage du chantier.

L'entreprise doit internaliser les compétences de pilotage qui sont normalement celle du maître d'œuvre, pour éviter de sortir de l'épure technique et financière. Ce n'est pas un rôle dont les entreprises pétrolières ont l'habitude, ni qu'elles assument avec facilité.

Dans le cas où le titulaire est le maître d'œuvre, celui-ci mise sur sa compétence, sa connaissance des données géologiques, sa capacité de pilotage de l'entreprise de forage et des sociétés de services, pour réaliser une opération rémunératrice. Il s'agit toutefois d'une prise de risque importante, eu égard aux tailles respectives des entreprises.

Dans le forfait, l'entreprise titulaire du marché évalue la part de risques de l'opération, fixe sa marge, mais sa rémunération reste aléatoire.

12.3.5. Gestion des aléas de chantier

En cas de survenue d'un aléa de chantier qui ne soit pas lié à une erreur du foreur ou à un matériel défectueux, le titulaire est responsable des moyens qu'il met en œuvre pour résoudre le problème au plus vite.

La responsabilité du maître d'ouvrage n'est théoriquement pas engagée. Mais la difficulté sera de déterminer l'origine réelle du sinistre et les responsabilités qui en découlent.

12.4. LES CONTRATS DE FORAGE EN RÉGIE CONTRÔLÉE

12.4.1. Description

Dans le cas de la régie (dite contrôlée), le maître d'œuvres pilote tout ou partie des entreprises et des fournisseurs présents sur le chantier (entreprise de forage, sociétés de services, fournisseurs de tubages...). Il assure la responsabilité du contrôle géologique. Il propose et fait approuver les modifications du programme rendues nécessaires par les données géologiques de terrain, imprévisibles.

Les rémunérations sont variables sur la base d'un bordereau des prix, approuvé à l'avance par le maître d'ouvrages.

C'est généralement la durée des opérations qui est le paramètre variable le plus important, en raison du coût de fonctionnement élevé de la machine de forage. Mais il peut y en avoir d'autres comme les quantités de boue, de ciment, etc.

12.4.2. Conditions d'application

Fondamentalement, le contrat en régie repose, pour certaines phases de réalisation, sur un engagement de moyens sans engagements en termes de délais et de coûts.

Ce type de contrat est parfaitement adapté à des opérations à risques. On peut considérer que toute opération de forage représente un risque plus ou moins important selon les zones et les objectifs des forages. Ce peut être particulièrement le cas pour des opérations à caractère scientifique, ou réalisées dans des zones géologiquement peu connues.

Parmi les zones géothermiquement très peu connues, on peut citer toutes les régions françaises en dehors de l'Île-de-France et d'une partie l'Aquitaine. Comme aquifère peu reconnu, on peut également citer le Trias en Île-de-France.

L'aquifère du Dogger en Île-de-France est pour sa part relativement bien connu sur le plan géologique. La réalisation de forages déviés en gros diamètre reste néanmoins une opération dont il ne faut en aucun cas minimiser les risques.

12.4.3. Position de la maîtrise d'ouvrage

Dans le contrat en régie, la maîtrise d'ouvrage n'a qu'une vision approchée du coût final de l'ouvrage et des délais de réalisation. Il lui faut donc provisionner les surcoûts éventuels.

Pour se prémunir contre les malfaçons, il apparaît souhaitable que le maître d'ouvrage recoure à un contrat de supervision de forage. Il contracte avec une entreprise chargée de contrôler, la conformité et la qualité de la réalisation en continue.

Pour cela, il est nécessaire de négocier un coût d'objectif et des délais de réalisation assortis de clauses de bonus malus.

L'évaluation des surcoûts ou des économies que peut entraîner un contrat en régie est délicate. Le maître d'ouvrage dispose de deux possibilités, soit s'en remettre au maître d'œuvre, avec le risque que la somme des prévisions et des surcoûts ne devienne un coût d'objectif commun au maître d'œuvre et au foreur, soit avoir recours à un expert extérieur ce qui pose le problème de sa sélection.

12.4.4. Position du titulaire du marché de forage

La rémunération de l'entreprise de forage est sûre et croissante avec la durée et le volume des opérations.

En contrepartie, l'entreprise doit être en mesure de démontrer, à tout moment, que ses équipements sont irréprochables et que ses équipes présentes sur le chantier ont la compétence et l'expérience requise.

L'entreprise doit en particulier être dotée d'une charte de contrôle des équipements, de sécurité et d'assurance de la qualité.

Des pénalités peuvent être appliquées à l'entreprise de forage en cas de manquement à ses obligations.

12.4.5. Responsabilité du maître d'œuvre

Le maître d'œuvre, en tant que sachant et en tant que pilote dans les opérations de chantier, supporte une responsabilité importante.

Vis-à-vis de la maîtrise d'ouvrage, le maître d'œuvre a une obligation de transparence, de compétence et de conseil. Il doit en particulier être capable d'analyser les risques encourus par le chantier et leurs conséquences en termes de délais et de coûts.

Le maître d'œuvre doit être en mesure de fixer un coût d'objectif assorti d'une marge d'incertitude raisonnable. Il doit s'engager sur l'économie des moyens mis en œuvre pour réaliser un ouvrage conforme, dans les meilleurs délais.

Sur le chantier, le maître d'œuvre doit disposer d'une présence physique suffisante (ingénieurs de forages, intendants de forage), notamment pendant les phases critiques, pour assurer un pilotage et un contrôle efficace.

En cas de malfaçon, la responsabilité du maître d'œuvre est engagée. Il doit donc disposer d'une assurance responsabilité civile dimensionnée en conséquence.

12.4.6. Gestion des aléas de chantier

En cas de survenu d'un aléa de chantier, susceptible de provoquer l'allongement des délais de réalisation, des surcoûts, ou les deux, le maître d'œuvre doit présenter à la maîtrise d'ouvrage les différentes solutions possibles, pour sortir de la situation de crise, et leurs incidences sur la suite du chantier, sur l'ouvrage, les coûts, les délais, etc.

Si l'aléa de chantier est lié à la transgression des règles de l'art, de son fait ou du fait de l'entreprise de forage, la responsabilité du maître d'œuvre est engagée.

La maîtrise d'ouvrage (le chef de projet du maître d'ouvrage, assisté de son AMO et, éventuellement, du superviseur de forage) doit choisir parmi les solutions présentées par le maître d'œuvre celle qui devra être mise en œuvre. Ce faisant, il endosse la responsabilité du choix et de ses conséquences.

La notion de compétence interne à la maîtrise d'ouvrage (et à son assistance) est donc fondamentale dans la régie.

12.5. LA COUVERTURE DES RISQUES

Le risque géologique et hydrogéologique.

Le risque de chantier.

La mutualisation des risques.

12.6. ÉVALUATION DES COÛTS

12.6.1. Du devis au coût de réalisation

À l'issue des études détaillées, le maître d'œuvre ou le bureau d'études établit un devis pour la réalisation du doublet. Il s'agit, à ce stade, d'un coût probable.

Le devis deviendra un coût final dans le contrat au forfait et un coût d'objectif dans le contrat en régie.

Le devis prévisionnel d'un doublet de forage comporte des aspects fixes, pratiquement indépendants de la localisation, des aspects proportionnels à des variables de temps,

de quantité ou d'espace, liés aux caractéristiques des forages, mais d'évaluation plus ou moins précise, et des coûts imprévus.

On trouvera en infra une estimation des enveloppes à prévoir pour les différents poste d'un doublet et le poids relatif de chacun par rapport au coût total.

Montant estimatif en K€ HT (valeurs 2009) pour un doublet constitué de deux puits déviés avec colonne de production 9"5/8 en acier.

Postes		Production + Injection	%
Plateforme	- géotechnique - construction plateforme - pose tube guide - remise en état	700	7,4 %
Forage	- amenée-repli-ripage - location machine - fuel	600 2100 300	6,3 % 22,1 % 3,2 %
Fluides de forage	- produit boue et société de services - traitement et évacuation des déblais	450 900	4,7 % 9,5 %
Déviations	- matériel et société de services	620	6,5 %
Cimentations	- matériel de cimentation, matériel de centrage - fourniture ciment, société de services	800	8,4 %
Tubages	- fourniture, vissage, accessoires	900	9,5 %
Outils de forage		180	1,9 %
Essais de puits et mesures	- diagraphies - air-lift - acidification - essais de production	400	4,2 %
Supervision et contrôle	- intendant de forage - surveillance géologique	500	5,3 %
Divers	- eau, téléphone, gardiennage - imprévus	500	5,3 %
Têtes de puits		150	1,6 %
Assurances forage	- assurance TRC - franchise sinistre	400	4,2 %
TOTAL doublet (k€ HT)		9 500	

Ce devis concerne la réalisation des ouvrages. Il n'est pas pris en compte le matériel de pompage, de traitement du puits et les installations afférentes au raccordement et à la mise en production de la boucle géothermale.

Parmi les aspects fixes, on compte la maîtrise d'ouvrage, les études d'avant projet, les têtes de puits, la déviation, les diagraphies, les essais. Il s'agit d'éléments qui peuvent être évalué avec précision. Ils sont relativement répétitifs d'un ouvrage à un autre.

Les aspects proportionnels portent sur le linéaire de tubages et leurs équipements, la surveillance géologique, la location de la machine de forage, l'évacuation des déblais de forage, les consommables. Il s'agit d'éléments spécifiques à la localisation de

l'ouvrage et au contexte géologique local. Leur évaluation sera d'autant plus précise que ce contexte est mieux connu.

Les aspects plus aléatoires concernent le génie civil, le volume de boue, et dans une moindre mesure le volume de ciment et le nombre des outils.

Enfin, le poste des imprévus mérite d'être explicité. Ce poste ne représente pas les oublis que le maître d'œuvre aurait pu faire dans sa cotation. Il s'agit en fait des aléas de chantier liés à la survenue d'évènements imprévisibles entraînant des surcoûts.

12.6.2. Le coût final pour le maître d'ouvrage

Alors que le devis de forage porte sur un coût de revient probable, le coût final de réalisation intègre les différents éléments de l'investissement et les aléas.

Dans un monde parfait, le coût final pour le maître d'ouvrage est indépendant de la nature du contrat de forage.

En effet, les différents éléments du coût sont simplement déplacés, voir les deux schémas ci-dessous. Les schémas sont présentés en pyramide inversée pour bien marquer comment s'apprécie l'équilibre d'un projet, plus la base (maîtrise d'ouvrage, études, maîtrise d'œuvre) est large, plus l'équilibre est stable ...

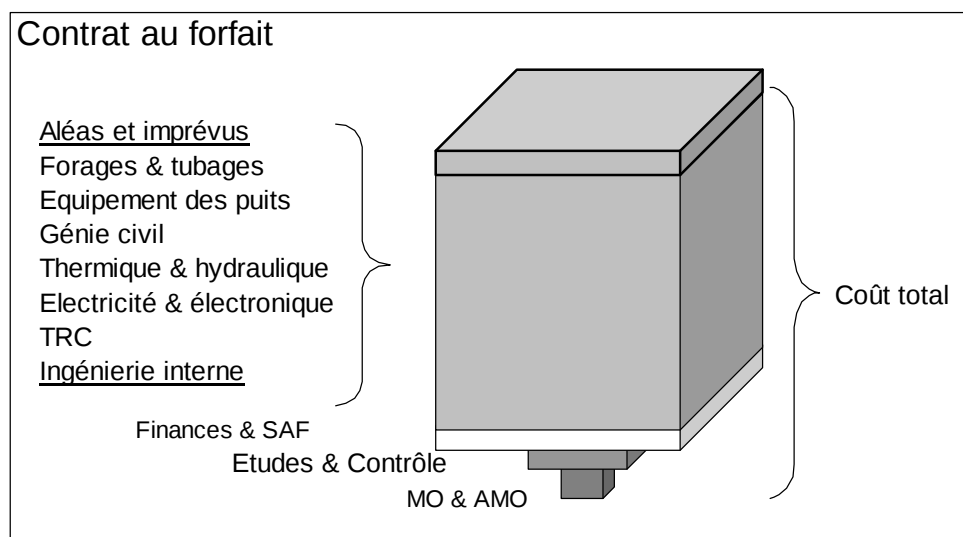


Figure 6 - Coût d'une opération au forfait.

Dans le contrat au forfait, l'entreprise de forage internalise les aléas, les imprévus ainsi qu'une capacité d'ingénierie. Dans le même temps, les prestations intellectuelles baissent avec une maîtrise d'œuvre plus réduite.

Toutefois, l'entreprise de forage aura tendance à intégrer de forts imprévus car elle ne pourra pas compenser les risques encourus sur un volume suffisant d'ouvrages. Elle aura également tendance à limiter ses coûts autant que possible, parfois au détriment

de la qualité de réalisation des ouvrages dès lors qu'elle en aura l'opportunité technique ou contractuelle.

Cette situation peut générer différents risques qui pourront être :

- qualitatif pour le forage, avec des conséquences immédiates ou futures pouvant aller jusqu'à engager la pérennité des ouvrages ou/et l'exploitation du site ;
- financiers pour l'entreprise en cas d'aléas importants sur le forage ;
- financiers pour le maître d'ouvrage si les travaux n'aboutissent pas au résultat prévu sans que l'entreprise de forage puisse être mise en cause ;
- juridique et financier pour l'ensemble des parties en cas de contentieux.

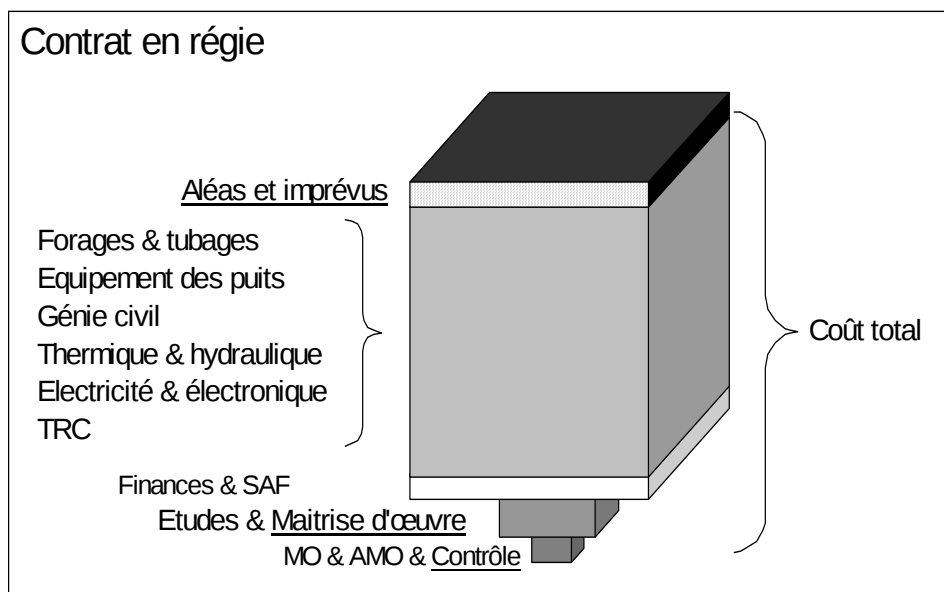


Figure 7 - Visualisation du coût d'une opération en régie.

Dans le contrat en régie, le maître d'ouvrage doit provisionner de son côté les aléas et les imprévus, la maîtrise d'œuvre et doit se doter de moyens de contrôle renforcés.

12.7. RÉCAPITULATIF

La réalisation d'une opération géothermique au Dogger apparaît donc comme une opération coûteuse, capitalistique et complexe. Pour la conduire à bonne fin, le maître d'ouvrage doit mettre en place une structure d'appuis spécifique pour la durée du projet avec, notamment, une assistance à la maîtrise d'ouvrage.

Le contrat au forfait est adapté à des réalisations pour lesquelles l'aléa est faible, sinon réellement maîtrisé, et pour une maîtrise d'ouvrage qui ne souhaite pas mettre en place les structures nécessaires pour se doter d'une compétence élargie. Il permet à la maîtrise d'ouvrage d'avoir une vision claire du coût de l'ouvrage. Cependant, pour se prémunir contre les malfaçons, le maître d'ouvrage doit recourir à un contrat de

supervision de forage. Pour limiter ses risques, l'entreprise titulaire du marché de forage doit, quant à elle, internaliser les compétences de pilotage qui sont normalement celle du maître d'œuvre. La responsabilité du maître d'ouvrage n'est que rarement engagée en cas de survenue d'un aléa. La qualité des ouvrages peut toutefois pâtir de l'objectif financier dévolu aux entreprises de forage, que ce soit dans la qualité des matériaux utilisés ou dans la minimisation des moyens employés.

Dans le contrat en régie, la maîtrise d'ouvrage a une vision approchée du coût final de l'ouvrage et des délais de réalisation. Les rémunérations sont variables sur la base d'un bordereau des prix, approuvé à l'avance par le maître d'ouvrages. La difficulté pour le maître d'ouvrage est de s'assurer qu'il n'y ait pas collusion entre le maître d'œuvre et l'entreprise de forage. L'expérience passée a montré que les travaux en régie pouvaient conduire à des dépassements comme à des réductions des coûts et des délais.

Les travaux en régies réalisées par des maîtres d'œuvre compétents sont aussi le moteur d'une évolution qualitative que les entreprises de forage n'ont pas la capacité d'assurer. À titre d'exemple, on notera la nette diminution des temps de réalisation des forages au Dogger, passant de 60 jours pour les premiers ouvrages à 45 jours aujourd'hui. Cela s'est fait grâce à un travail d'optimisation permanent et à une capitalisation de l'expérience, et ce en dépit de la forte augmentation des contraintes.

La notion de compétence interne à la maîtrise d'ouvrage est fondamentale dans la régie car, en cas de survenue d'un aléa, le maître d'ouvrage endosse la responsabilité du choix de la solution destinée à sortir de la crise, et ses conséquences. Le maître d'œuvre, en tant que sachant et en tant que pilote dans les opérations de chantier, supporte également une responsabilité importante. Le contrat en régie est particulièrement adapté à des opérations à risques, comme les opérations à caractère scientifique, ou réalisées dans des zones géologiquement peu reconnues.

On notera, en définitive, que les points clefs pour la réussite de la réalisation des opérations de géothermie, quelque soit le type de contrat choisi, sont la compétence et les moyens déployés par la maîtrise d'ouvrage, la qualité des études préalables et un suivi de réalisation rigoureux et loyal.

13. Conclusions

La réalisation de forages géothermiques au Dogger dans le Bassin parisien est une opération coûteuse, techniquement complexe, soumise à de nombreuses contraintes propres aux technologies employées et à l'environnement des chantiers. Les spécifications des forages géothermiques au Dogger évoluent progressivement depuis les années 1980, en fonction des expériences antérieures, des connaissances acquises, des contraintes environnementales, des conditions économiques du moment et des besoins exprimés par les maîtres d'ouvrage.

Les contraintes environnementales deviennent de plus en plus fortes et exigeantes. Elles ont des incidences non négligeables sur l'organisation des chantiers et sur les coûts.

Le matériel évolue, mais lentement et sans que l'on constate un bond technologique marqué.

La réalisation de puits déviés en gros diamètre (9"5/8 au réservoir) s'avère de plus en plus fréquente. Les principales raisons de ce choix sont de minimiser les pertes de charge et de rendre ultérieurement possible le rechemisage des puits.

L'usage des tubages en acier de grade pétrolier semble devoir rester une règle, en particulier pour la construction des puits déviés.

Les tubings amovibles et casings en composite sont rarement envisagés lors de la construction des ouvrages. Ils sont le plus souvent rejetés pour des raisons de coût. Mais on pourrait voir apparaître des tubings amovibles sur de futures opérations de rechemisage. Un contrôle efficace du vieillissement de ces matériaux reste à mettre en place.

Une évolution technique des cimentations semble progressivement voir le jour avec l'utilisation de ciments allégés. Dans le domaine qualitatif toutefois, un travail important reste à mener, rendu encore difficile par le manque d'outils de mesures appropriés.

Lors des réhabilitations, le choix entre doublet et triplet est avant tout économique. Mais cette option semble également devoir imposer une réflexion stratégique sur la gestion de la ressource, tant localement que régionalement.

Le choix dans les méthodes de conduite des travaux de forage doit être clairement énoncé aux maîtres d'ouvrage dont les habitudes sont souvent éloignées des usages de la profession, entre la « Régie » et le « Forfait ». Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients qu'il faut mettre en balance.



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