

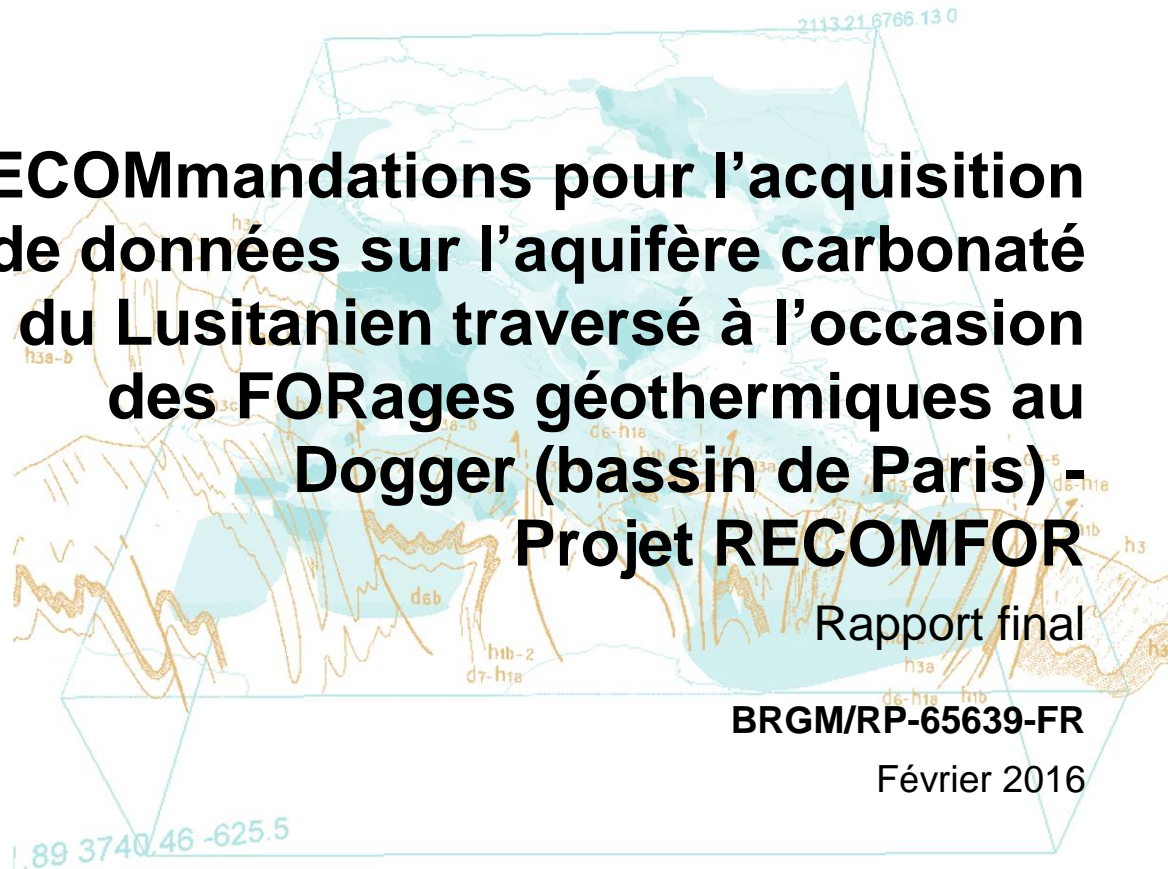


**RECOMmandations pour l'acquisition
de données sur l'aquifère carbonaté
du Lusitanien traversé à l'occasion
des FORages géothermiques au
Dogger (bassin de Paris) -
Projet RECOMFOR**

Rapport final

BRGM/RP-65639-FR

Février 2016



RECOMmandations pour l'acquisition de données sur l'aquifère carbonaté du Lusitanien traversé à l'occasion des FORages géothermiques au Dogger (bassin de Paris) - Projet RECOMFOR

Rapport final

BRGM/RP-65639-FR

Février 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques du BRGM
dans le cadre de la Convention ADEME 2015

S. Caritg, F. Bugarel, O. Goyénèche (BRGM), O. Audouin (CFG-Services)

Vérificateur :

Nom : Virginie HAMM

Fonction : Responsable de
programme « Géothermie et
stockage d'énergie thermique dans
les hydrosystèmes »

Date : 24/02/2016

Signature :



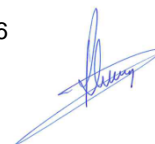
Approbateur :

Nom : Philippe ROCHER

Fonction : Responsable de la
Division Géothermie

Date : 26/02/2016

Signature :



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



Mots-clés : Géothermie ; Géothermie basse énergie ; Géothermie basse température ; Réservoirs géothermiques carbonatés ; Aquifères carbonatés ; Lusitanien ; Dogger ; Doublets géothermiques ; Acquisitions de données ; Forages géothermiques, Diagraphies, Tests hydrogéologiques ; France ; Île-de-France ; Val-de-Marne ; Seine-Saint-Denis.

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

Caritg S., Bugarel F., Goyénèche O. Audouin (2016) - RECOMmandations pour l'acquisition de données sur l'aquifère carbonaté du Lusitanien traversé à l'occasion des FORages géothermiques au Dogger (bassin de Paris) - Projet RECOMFOR. Rapport final. BRGM/RP-65639-FR, 50 p., 5 fig., 9 tabl.

Synthèse

Plus d'une trentaine de doublets géothermiques exploitant l'aquifère carbonaté du Dogger pour l'usage direct de sa chaleur fonctionnent aujourd'hui sur le bassin de Paris. Or, la multiplication de ces opérations, essentiellement concentrée sur les départements du Val-de-Marne, de Seine-Saint-Denis et de Seine-et-Marne, augmente le risque de surexploitation avec le refroidissement de la ressource géothermale, en laissant peu de place disponible pour la réalisation de nouvelles opérations, notamment au sud-est de Paris.

Pourtant, les techniques de valorisation des ressources géothermales (PAC, Bâtiments HQE) ayant évolué, l'exploitation d'autres aquifères, moins profonds, pourrait être aujourd'hui envisagée. Il serait, de fait, opportun d'encourager le recours à ces nouvelles ressources à l'occasion de nouvelles opérations de géothermie qui se réalisent au rythme de 3 par an actuellement. C'est le cas notamment de l'aquifère du Lusitanien, situé au-dessus du Dogger et pour lequel une évaluation de son potentiel géothermique a déjà été financée par le BRGM, l'ADEME Île-de-France et le Conseil Régional (Caritg *et al.*, 2014). Si les résultats de cette étude sont encourageants, le manque avéré de données spécifiques à la géothermie et ciblées sur cet aquifère carbonaté, constitue aujourd'hui un réel frein pour consolider nos interprétations et envisager concrètement son exploitation par le biais d'une étude de faisabilité technico-économique robuste.

Il devient donc urgent et nécessaire, d'encourager l'acquisition de données nouvelles, autres que celles habituellement mises en œuvre par le maître d'ouvrage lorsqu'un nouveau doublet géothermique au Dogger est réalisé.

Proposé, mené et réalisé par le BRGM, le projet RECOMFOR s'inscrit dans le cadre des projets d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM associés à la Convention ADEME-BRGM 2015 (n° 1505C0015) pour le développement de la chaleur géothermique. Cette dernière a été signée le 10 août 2015 pour une durée contractuelle de 8 mois.

D'un montant total de 65 k€ HT, il a été cofinancé par le BRGM et l'ADEME à hauteur de 50 % chacun. La sous-traitance a été confiée à CFG-Services, filiale du BRGM reconnue dans le domaine du forage géothermique profond, et en particulier sur les projets visant le Dogger du bassin de Paris.

L'objectif du projet RECOMFOR est de proposer une ou plusieurs méthodologies d'acquisition de données permettant d'améliorer la connaissance des formations aquifères pouvant servir de relais aux réservoirs géothermiques en passe d'être surexploités, mais insuffisamment connues pour servir de cible à des opérations de géothermie basse énergie. Cette acquisition de données concernera donc spécifiquement les formations carbonatées du Lusitanien au regard du Dogger déjà fortement sollicité.

Cette méthodologie aura pour but de mieux caractériser les aquifères recoupés en termes de propriétés réservoirs (transmissivité, perméabilité, épaisseur utile, lithologie, profil de température,...) afin d'encourager le développement de l'exploration visant d'autres aquifères carbonatés non encore exploités dans les bassins sédimentaires de métropole.

Après avoir synthétisé, sélectionné puis hiérarchisé diverses méthodes et outils éprouvés de mesure sur forage, disponibles sur le marché, six programmes d'acquisition de données ont été élaborés et proposés dans ce projet. La mise en œuvre de ces programmes lors d'un nouveau forage au Dogger a ensuite été analysée aussi bien d'un point de vue technique et financier qu'assurantiel et juridique.

Ainsi, si le programme n° 1 associant les mesures de débit par tests hydrogéologiques aux diagraphies différées de Porosité Neutron s'avère le plus pertinent pour acquérir des données sur l'aquifère du Lusitanien, il est aussi l'un des plus onéreux et surtout le plus risqué à mettre en place. Les trois programmes suivants associent des mesures de perméabilité sur échantillon (carotte, mini-carottes ou déblais) à des diagraphies différées de Résonances Magnétique Nucléaire et de Porosité Neutron. Le type d'échantillonnage impactant considérablement les risques techniques et coûts engendrés, le programme n° 3 visant à acquérir des données de perméabilité sur mini-carottes paraît être le meilleur compromis. Enfin, les deux derniers programmes (n° 5 et n° 6) ne s'appliquent à mettre en œuvre que des diagraphies différées permettant qu'acquérir les données de perméabilité et porosité log. Si ces derniers limitent les risques techniques et coûts d'application, ils restent néanmoins peu satisfaisants pour déterminer les zones productrices du réservoir.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	9
1.2. OBJECTIFS ET DÉMARCHE ADOPTÉE.....	10
2. Synthèse et évaluation des outils/méthodes de mesures sur forage actuellement disponibles.....	11
2.1. DIAGRAPHIES	11
2.1.1. Méthodes de mesures diagraphiques instantanées <i>versus</i> différées.....	11
2.1.2. Diagraphies différées (Wireline Logging)	12
2.2. TESTS HYDROGÉOLOGIQUES	17
2.2.1. Essais de formation	17
2.2.2. Drill Stem Test (DST).....	18
2.2.3. Mini-DST (mini- Drill Stem Test).....	18
2.3. MESURES SUR ÉCHANTILLONS DE ROCHE	19
2.3.1. Techniques de forages et échantillonnage.....	19
2.3.2. Perméabilité sur carottes (plugs).....	22
2.3.3. Perméabilité sur déblais (cuttings)	23
2.3.4. Perméabilité sur mini-carottes.....	23
2.4. SÉLECTION ET HIÉRARCHISATION DES MÉTHODES ET PROPOSITION DE PROGRAMMES D'ACQUISITION	24
3. Évaluation technico-économique des programmes d'acquisition et analyse des risques.....	27
3.1. PRÉAMBULE / AVANT-PROPOS.....	27
3.1.1. Réflexion sur une possible couverture assurantielle des risques spécifiques à la mise en place des programmes.....	27
3.1.2. Phases de forage communes à l'ensemble des programmes	29
3.2. PROGRAMME 1 : ESSAIS DE FORMATION ET POROSITÉ NEUTRON DIFFÉRÉE	32
3.2.1. Programme de forage et de test.....	32
3.2.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	34
3.2.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants	34
3.2.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	35
3.3. PROGRAMME 2 : PERMÉABILITÉ SUR CAROTTE, PERMÉABILITÉ RMN ET POROSITÉ NEUTRON DIFFÉRÉES	35
3.3.1. Programme de forage	35
3.3.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	36
3.3.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants	36

3.3.4.	Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	37
3.4.	PROGRAMME 3 : PERMÉABILITÉ SUR MINI-CAROTTE, PERMÉABILITÉ RMN ET NEUTRON DIFFÉRÉES	37
3.4.1.	Programme de forage	37
3.4.2.	Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	38
3.4.3.	Analyse des risques techniques et verrous correspondants	38
3.4.4.	Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	39
3.5.	PROGRAMME 4 : PERMÉABILITÉ SUR DÉBLAIS, PERMÉABILITÉ RMN , POROSITÉS NEUTRON ET SONIQUE DIFFÉRÉES	39
3.5.1.	Programme de forage	40
3.5.2.	Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	40
3.5.3.	Analyse des risques techniques et verrous correspondants	41
3.5.4.	Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	41
3.6.	PROGRAMME 5 : PERMÉABILITÉ RMN, POROSITÉS NEUTRON ET SONIQUE DIFFÉRÉES	41
3.6.1.	Programme de forage	41
3.6.2.	Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	42
3.6.3.	Analyse des risques techniques et verrous correspondants	42
3.6.4.	Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	43
3.7.	PROGRAMME 6 : POROSITÉS NEUTRON, SONIQUE ET RÉSISTIVITÉ DIFFÉRÉES	43
3.7.1.	Programme de forage	43
3.7.2.	Estimation du surcoût lié au volet exploratoire	44
3.7.3.	Analyse des risques techniques et verrous correspondants	44
3.7.4.	Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage ...	44
3.8.	TABLEAU DE SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION TECHNIQUE-ÉCONOMIQUE ET DES RISQUES ASSOCIÉS	45
4.	Conclusion et recommandations	47
5.	Bibliographie	49

Liste des figures

Figure 1 : Carotte issue d'un forage carotté au Trias (bassin de Paris) dans laquelle a été prélevé un échantillon (plug) pour réaliser une mesure de couple porosité/perméabilité.	19
Figure 2 : Trépan « tricône » utilisé dans le cadre des forages destructifs de type rotary.....	20
Figure 3 : Déblais issus d'un forage destructif (rotary) observés au travers d'une loupe binoculaire : fragments millimétriques de calcaires oolithiques du Lusitanien (forage Blanc Mesnil, bassin de Paris).	21
Figure 4 : Mesure de la perméabilité réalisée en laboratoire sur un échantillon de carotte (plug).	22
Figure 5 : Coupe géologique et technique pour un forage classique au Dogger.	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse et évaluation des méthodes de mesure par diagraphies différées mises en place après le forage.....	16
Tableau 2 : Sélection et hiérarchisation des méthodes de mesures sur forage les plus pertinentes pour la géothermie basse énergie.	25
Tableau 3 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 1.	34
Tableau 4 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 2.	36
Tableau 5 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 3.	38
Tableau 6 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 4.	40
Tableau 7 - Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 5.	42
Tableau 8 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 6.	44
Tableau 9 : Évaluation technico-économique des programmes d'acquisition retenus et analyse des risques.	46

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Selon la terminologie actuelle, l'aquifère du Lusitanien (ainsi nommé par les foreurs) correspond à l'ensemble des formations carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur, comprises entre les séries marneuses de l'Oxfordien inférieur (sous-jacent) et du Kimméridgien (sus-jacent). Il est connu depuis les années 70 comme étant un réservoir géothermal potentiel au droit de la région parisienne (Housse et Maget, 1976 ; Bouniol et Maget, 1983 ; Bouniol, 1985 ; Bel *et al.*, 2012a et 2012b).

Une étude récente, réalisée par le BRGM en cofinancement avec le Conseil Régional et l'ADEME Île-de-France (Caritg *et al.*, 2014) a mis en évidence son intérêt pour la production de chaleur géothermique (Géothermie Basse Energie) en région Île-de-France, caractérisé par :

- une lithologie favorable à la présence de niveaux perméables tels que les calcaires oolithiques ou graveleux dont la porosité moyenne a été estimée entre 9 et 11 % à partir de l'analyse pétrophysique de 32 forages géothermiques sur la région Ile-de-France ;
- une propriété aquifère (perméabilité) indiquée régulièrement lors de la réalisation de travaux de forage ciblant le Dogger par des pertes (ou venues) de fluide et quelques tests réalisés dans les années 80 sur les sites géothermiques d'Ivry-sur-Seine (forage GIV-2), d'Orly (forage GORY-2), de Reims-Murigny (forage GMUR-1) et de Vigneux-sur-Seine (forage VGS-1) ;
- une profondeur de gisement ciblée vers 1000-1500 m permettant d'envisager une température de la ressource de l'ordre de 50 à 65 °C et une épaisseur utile d'environ 40 à 90 m, dans les secteurs de Meaux et de Lagny-Fontainebleau (département de la Seine-et-Marne) mais aussi dans les départements du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis, où le Dogger est déjà fortement exploité.

Pour concevoir de nouveaux doublets géothermiques ciblant le Lusitanien, il reste pourtant nécessaire de connaître le débit maximal d'exploitation envisageable afin de déterminer la puissance thermique valorisable sur le réseau de chaleur et évaluer la performance énergétique du dispositif limitée dans le temps par la réinjection (percée thermique). En effet, la puissance thermique du dispositif dépend du couple débit / différentiel de température entre production et réinjection.

Or, si la température de production de la ressource peut aujourd'hui être estimée avec une incertitude relativement faible (de l'ordre de 2 °C là où le Dogger est déjà exploité), celle portant sur le débit d'exploitation et la durée de fonctionnement du dispositif est beaucoup plus forte.

Ces paramètres dépendent en effet de la transmissivité du réservoir, c'est-à-dire de la capacité du réservoir à transmettre le fluide qu'il contient. La transmissivité correspond physiquement au produit de la perméabilité du réservoir par son épaisseur productrice. Ce sont donc principalement ces deux paramètres que l'on va chercher à évaluer au travers de différentes techniques de forage, essais hydrogéologiques et instrumentations des puits (diagraphies), et qui font défaut à l'heure actuelle.

Ainsi, pour répondre à l'objectif fixé par le Grenelle de l'Environnement d'ici 2020 et développer la production de chaleur géothermique par usage direct, il devient urgent d'acquérir de nouvelles données sur le Lusitanien en nombre et qualité suffisantes pour :

- mieux caractériser les propriétés « réservoir » de cet aquifère ;
- anticiper les investissements liés à l'architecture des forages ;
- évaluer la rentabilité économique des projets au stade des études de faisabilité.

De plus, le choix d'un aquifère sus-jacent au Dogger tel que le Lusitanien, moins profond mais aussi moins chaud, vise à réaliser les économies suivantes :

- économie d'énergie : l'exploitation d'une ressource géothermale moins chaude permet de mieux répondre à la demande énergétique d'un réseau de chaleur alimentant des bâtiments soumis aux réglementations thermiques actuelles (RT 2012 ou BBC), et donc nécessitant une puissance installée inférieure ;
- économie financière : le coût d'un forage étant proportionnel à la profondeur forée, l'investissement prévu pour un doublet au Lusitanien devrait être inférieur à celui d'un doublet au Dogger dont le toit est situé environ 300 m plus bas.

Enfin, favoriser le recours à l'aquifère du Lusitanien en tant que ressource géothermale pour la production de chaleur permettrait d'anticiper le risque à venir de surexploitation du Dogger dans les départements du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis (Hamm, 2014).

1.2. OBJECTIFS ET DÉMARCHE ADOPTÉE

Le projet RECOMFOR a pour objectif final de proposer un ou plusieurs programmes d'exploration du Lusitanien susceptible(s) d'être mis en place lors de la réalisation d'un nouveau forage géothermique au Dogger dans le bassin de Paris. Il s'intéresse, de fait, aux différentes méthodes de mesures sur forage déjà éprouvées sur le marché, qui permettront d'acquérir des données pertinentes sur cet aquifère, ciblées pour la géothermie basse énergie.

Pour ce faire, 2 phases successives, faisant chacune l'objet d'une partie de ce rapport, ont été nécessaires :

- la première phase synthétise les différents outils ou méthodes de mesures existants sur forage afin d'évaluer leur intérêt pour acquérir des données pertinentes sur le Lusitanien et proposer différents programmes d'acquisition de ces données dans le cadre d'un nouveau doublet au Dogger (partie 1) ;
- la deuxième phase détaille la mise en place technique de ces programmes d'acquisition avec pour l'ambition d'évaluer leur faisabilité technico-économique ainsi que les risques assurantiels associés (partie 0).

2. Synthèse et évaluation des outils/méthodes de mesures sur forage actuellement disponibles

Les outils et méthodes de mesures sur forage évalués dans ce projet sont ceux et celles déjà éprouvés dans le domaine du forage profond et disponibles sur le marché. Les méthodes de mesures géophysique sol telles que la tomographie sismique 3D (PVS-3D ou PVO-3D), l'électromagnétique (EM) ou encore le radar de puits, plutôt employées dans le cadre de projets de Recherche et Développement, ne seront ainsi pas abordées.

2.1. DIAGRAPHIES

2.1.1. Méthodes de mesures diagraphiques instantanées *versus* différées

La diagraphie est un enregistrement, en fonction de la profondeur, d'un paramètre lié à des caractéristiques des formations rocheuses traversées par un forage (Serra, 1984). Deux types de diagraphies peuvent être acquis :

- les diagraphies instantanées (Logging While Drilling) : elles enregistrent les caractéristiques de la formation pendant le forage par l'ajout de capteurs dans la garniture de forage. Les outils LWD transmettent les mesures acquises en fond de puits jusqu'à la surface généralement par l'intermédiaire d'un générateur d'impulsions transmises par la boue de forage ou par d'autres techniques améliorées (Serra O., 1984 ; Schlumberger, 1989 ; Schlumberger, 2012 et 2015a ; Weatherford, 2014a) ;
- les diagraphies différées (Wireline Logging) : elles déterminent les caractéristiques de la formation après le forage, une fois les équipements de forage du puits retirés. Les outils de mesure sont connectés à un câble électrique (wireline logging) et descendus dans le forage (Blanz *et al.*, 2010 ; Heaton *et al.*, 2012 ; Schlumberger, 2015b ; Weatherford , 2009, 2013, 2014b, 2014c, 2014d).

Si ces deux types de diagraphies fournissent des résultats similaires (les principes de mesures demeurant identiques pour les deux types d'enregistrement), comparativement aux diagraphies instantanées, les diagraphies différées présentent les avantages suivants :

- les coûts de mesure sont moins élevés que pour les diagraphies instantanées. La tarification des diagraphies instantanées impose en effet un coût additionnel pour chaque jour où le module est intégré à la garniture de forage. Or, la phase de forage traversant l'aquifère du Lusitanien dure plus de 10 jours, pour une zone d'intérêt d'environ 300 m d'épaisseur. La location des modules de mesures intégrés serait ainsi facturée pour l'ensemble des 10 jours de forage ;
- elles ne nécessitent aucune modification du programme de forage contrairement aux diagraphies instantanées. En effet, les mesures nécessaires à la caractérisation des formations géologiques du Lusitanien et/ou du Dogger peuvent être réalisées pendant l'opération de contrôle du diamètre du forage et du suivi géologique (mesures Caliper et Gamma-Ray). À noter cependant que la possibilité de combiner les outils augmente légèrement le temps de mesure du fait de l'assemblage d'un train d'outil plus long (durée supplémentaire estimée à environ 3h) ;
- la phase de diagraphie est indépendante de l'opération de forage, ce qui permet de bien fixer les limites de responsabilités liés à l'ajout d'un programme d'acquisition exploratoire,

- en cas de sinistre lié au coincement de la garniture de forage (pas d'équipement spécifique dans le puits pouvant être à l'origine du sinistre) ;
- en cas de risque important d'instabilité de la paroi du forage non couverte par un tubage (section en trou nu ou « open-hole »), la décision d'interrompre la descente des sondes de diagraphies différées peut être prise rapidement ;
- elles permettent de limiter les temps d'immobilisation du *rig*¹ de forage.

Il apparaît ainsi plus pertinent, dans le cadre de ce projet, de ne préconiser que l'utilisation des diagraphies différées, détaillées ci-après, moins risquées et moins coûteuses que les diagraphies instantanées.

2.1.2. Diagraphies différées (Wireline Logging)

Les diagraphies différées sont le terme général qui englobe toutes les mesures effectuées après le forage du puits, enregistrées par une ou plusieurs sondes descendues par un câble électro-porteur, le câble servant également à la transmission des données jusqu'à la surface. Lors du forage d'un puits au Dogger dans le bassin de Paris, des diagraphies différées de contrôle du diamètre du puits (Caliper) et de suivi géologique (Rayonnement Gamma Naturel) sont déjà réalisées en routine lors de la phase de traversée des formations du Lusitanien. Ces diagraphies permettent :

- pour la diagraphie Gamma-Ray (GR), qui mesure la radioactivité naturelle des formations, un recalage en profondeur des informations géologiques issues de l'analyse des déblais de forage ;
- pour la diagraphie diamètreur (Caliper), qui mesure le diamètre du trou nu, une estimation du volume de ciment nécessaire à la cimentation du tubage isolant l'aquifère du Lusitanien et l'aquifère du Dogger (étanchéité verticale et horizontale).

Pour acquérir les données nécessaires à la caractérisation des formations géologiques du Lusitanien, des diagraphies différées complémentaires peuvent être réalisées lors de l'opération de contrôle du diamètre du puits et de suivi géologique (mesures Caliper et Gamma-Ray). Hormis le fait d'augmenter légèrement le temps de mesure (assemblage plus long du train d'outils) et la possibilité de combiner plusieurs outils, la réalisation de diagraphies différées supplémentaires durant cette phase de contrôle ne pose donc aucun problème. Le surplus de temps peut être estimé à environ 3h.

À noter que pour des raisons de vitesse d'enregistrement plus faible, il est conseillé de réaliser la mesure de Résonance Magnétique Nucléaire avec uniquement le module Gamma-Ray. Le temps supplémentaire pour la réalisation de cette mesure peut être estimé à 5-6 h.

Enfin, pour limiter les risques liés à la durée supplémentaire d'intervention par rapport à l'intervention classique (instabilité des formations de l'Argovien et de l'Oxfordien), il pourrait être envisagé de forer la phase 12"1/4 jusqu'à la base du Rauracien et de procéder aux diagraphies avant la poursuite du forage. La réalisation des diagraphies avant la fin de la phase implique une augmentation des coûts liée à la durée de mobilisation du *rig*¹ de forage (nécessité de procéder à une remontée de la garniture de forage en cours de phase), à une augmentation des coûts des diagraphies (un amené-repli supplémentaire de l'unité de diagraphie et du personnel), à l'optimisation des caractéristiques de la boue et l'introduction précoce des inhibiteurs de gonflement des argiles.

¹ Rig : traduction anglaise de l' « appareil de forage » couramment utilisée dans le monde du forage.

Les principes de mesure, combinaisons d'outils, vitesses d'enregistrement, résolution verticale et profondeurs d'investigation des différents modules (outils) susceptibles d'être utilisés pour réaliser des diagraphies différées sur le Lusitanien (ou Dogger) sont décrits ci-dessous.

Le Tableau 1 présente pour sa part les avantages et intérêts de chacune de ces méthodes de mesure par diagraphie différée (détaillée ci-dessus) ainsi que le type de donnée obtenue pour caractériser les formations carbonatées du Lusitanien et du Dogger.

a) Module Gamma-Ray

Principe de mesure : La radiation naturelle gamma est émise par certains noyaux atomiques instables. Les trois principaux radioéléments présents dans les formations et qui sont responsables de ces émissions sont le Potassium (K-40), l'Uranium (U-238) et le Thorium (Th-232). La mesure du gamma naturel global enregistre les variations de l'activité totale. Le gamma naturel est principalement un indicateur d'argiles ou de schistes argileux, puisque les minéraux argileux sont souvent riches en radioéléments. Cette mesure est primordiale pour le recalage en profondeur des logs.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Mesure généralement intégrée à la télémétrie, le gamma-ray est ainsi intégré à toute autre mesure. Vitesse maximale de 1 100 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : 30 cm / 60 cm.

b) Module Diamètreur

Principe de mesure : le module de mesure est équipé de plusieurs bras palpeurs (3 à 8 dépendants ou indépendants). La sonde est descendue bras fermée jusqu'au fond du puits. Depuis la surface, l'ordre est donné aux bras de s'ouvrir. Au cours de la remontée, les bras en contact avec la paroi du puits enregistrent les variations de diamètre du forage.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : se combine avec la quasi-totalité des modules de mesures / Vitesse maximale de 1 100 m/h.

Pas de résolution verticale / ni de profondeur d'investigation pour les mesures diamètreur.

c) Module Porosité Neutron Compensé (NPHI)

Principe de mesure : Mesure des particules de neutrons thermiques non capturés par la formation (principalement par les atomes d'Hydrogène). A partir d'une source radioactive d'Am-Be.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Combinaison avec d'autres outils open-hole possible. Vitesse d'enregistrement d'environ 1 100 m/h (vitesse d'acquisition équivalente aux mesures de gamma-ray et de diamètreur).

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : Résolution : 16 pouces (41 cm). Profondeur d'investigation : 10 pouces (26 cm).

d) Module Photodensité (RHO)

Principe de mesure : Mesure de l'émission du rayonnement gamma par une source radioactive. L'énergie des rayons gamma, par effet Compton, est atténuée en fonction de la densité électronique moyenne de la formation.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Combinaison avec d'autres outils open-hole possible 1100 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : Résolution : 6 à 8 pouces (15 à 20 cm). Profondeur d'investigation : 3,9 pouces (10 cm).

e) Module Sonique

Principe de mesure : Caractérisation des vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement par l'émission d'une onde acoustique et l'enregistrement des ondes réfractées.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Possibilité de combinaison avec d'autres outils. Vitesse d'enregistrement d'environ 1 100 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : Résolution de 6 pieds (environ 1,8 m) en configuration dipôle. Environ 7 fois le diamètre du puits.

f) Module Imagerie de Paroi

Principe de mesure : Image orientée de la paroi du forage (microrésistivité type FMI, acoustique type BHTV).

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Possibilité de combinaison avec la majeure partie des outils. Nécessité de positionner l'outil d'imagerie en bas de combinaison. Vitesse d'enregistrement d'environ 500 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : Résolution verticale de 0,2 pouces (0,5 cm). Profondeur d'investigation : 1 pouce (2,5 cm) pour la micro-résistivité, paroi du puits pour l'acoustique.

g) Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)

Principe de mesure : Mesure du moment induit des noyaux d'hydrogène contenu dans la roche poreuse.

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Possibilité de combinaison avec d'autres outils mais généralement est utilisée avec uniquement un Gamma-Ray. Vitesse d'enregistrement d'environ 200 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : Résolution verticale 9 pouces (22,86 cm). Profondeur d'investigation 1,5 pouces (3,8 cm).

h) Résistivité

Principe de mesure : Le module de mesure est composé de plusieurs électrodes qui fournissent une estimation de la résistivité à différentes profondeurs d'investigation. L'intérêt

est de pouvoir différencier la résistivité de la zone saine de celle de la zone envahie (où le fluide de formation a été remplacé par la boue de forage).

Combinaisons d'outils / Vitesses d'enregistrements : Possibilité de combinaison avec d'autres outils. Vitesse d'enregistrement d'environ 1100 m/h.

Résolution verticale / Profondeur d'investigation : résolution verticale de 60 cm / profondeur d'investigation : de 0,4 à 1,3 m.

Types de diagraphie différée (hors Gamma Ray et Diamètreur déjà réalisés en routine)	Données obtenues	Intérêt	inconvénients
Porosité Neutron Compensé (NPHI)	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en hydrogène qui peut être reliée à la porosité totale dans le cas d'un aquifère ; - Caractéristiques lithologiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêt majeur : Seule mesure directe de la porosité totale du réservoir ; - Rapidité de la mesure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inconvénient majeur : Utilisation d'une source radioactive d'où un risque d'abandon du puits en cas de perte de la source radioactive.
Photodensité (RHO)	<ul style="list-style-type: none"> - Densité des formations qui marque aussi, par déduction leurs caractéristiques lithologiques ; - Propriétés minérales (par effets photo-électriques) ; - Porosité dans le cas d'une formation constituée d'une roche monominérale. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêt faible de la donnée obtenue (densité) ; - Compensation automatique des effets de paroi et du mudcake ; - Rapidité de la mesure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inconvénient majeur : Utilisation d'une source radioactive d'où un risque d'abandon du puits en cas de perte de la source radioactive ; - Mesure indirecte de la porosité basée sur l'hypothèse d'une roche monominérale et d'un seul fluide.
Sonique	<ul style="list-style-type: none"> - Porosité et lithologie ; - Fracturation ; - Perméabilité, à partir de l'analyse des ondes de Stoneley. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêts majeurs : Données obtenues et profondeur d'investigation importante (2,18 m pour un trou en 12"1/4) ; - Mesure rapide qui peut être couplée aux autres mesures open-hole. Estimation de la perméabilité de fractures (J. L. Mari, 1994). 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible résolution verticale en mode dipôle.
Imagerie de paroi (Slatt, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> - Fracturation ; - Texture des calcaires ; - Détection et évaluation de la porosité secondaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Orientation des structures ; - Identification de la nature des niveaux producteurs (porosité primaire ou secondaire) ; - Diamètre de puits jusqu'à 21 pouces pour FMI, 12"7/8 pour BHTV. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilité de la sonde de mesure, nécessité de réaliser une descente au préalable d'un outil type diamètreur pour vérifier que le puits est libre ; - Mesure moins rapide que les mesures classiques open-hole.
Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)	<ul style="list-style-type: none"> - Porosité et de la perméabilité ; - Estimation de la composition de la roche ; - Détermination du type du fluide (eau, huile, gaz). 	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêt majeur : seule mesure in-situ de la perméabilité matricielle ; - Pas de diamètre maximal du puits car la mesure peut se faire excentrée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inconvénient mineur : mesure 5 à 6 fois plus lente que les diagraphies open-hole classiques, mais raisonnable compte tenu d'un intervalle de mesure de 300 m (soit une durée de 1h30) ; - La mesure étant lente à acquérir, il est nécessaire de ne cibler que les horizons présentant un intérêt (formations carbonatés du Lusitanien par exemple) pour éviter de prolonger l'opération et donc augmenter son coût.
Résistivité	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination de la résistivité de la formation ; - Détermination du profil d'invasion ; - Estimation de la porosité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimation de la résistivité in-situ ; - Localisation des zones potentiellement productrices en comparant résistivité proche (shallow) et résistivité lointaine (deep) ; - Possibilité de créer un profil d'invasion si la mesure est combinée avec mesure RMN. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'estimation directe de la porosité.

Tableau 1 : Synthèse et évaluation des méthodes de mesure par diagraphies différées mises en place après le forage.

2.2. TESTS HYDROGÉOLOGIQUES

La notion d'échelle est une donnée importante dans la caractérisation hydrodynamique des aquifères. Les tests en laboratoire ne permettant pas de caractériser les circulations préférentielles à une échelle supérieure à la carotte (présence de vacuoles, fractures ...), les tests hydrauliques *in-situ* sont les seules méthodes permettant d'estimer la perméabilité à l'échelle du mètre jusqu'au kilomètre.

2.2.1. Essais de formation

Ces tests correspondent aux méthodes de détermination de la transmissivité mis en œuvre à la fin du forage et après retrait de la garniture de fond de puits. Ces tests nécessitent la mise en eau du puits (retrait de la boue de forage) et donc l'isolation des formations argileuses (Guéguen *et al.*, 1996 ; Ayan *et al.*, 2001 ; Dominique Bourdet, 2002 ; Tarek Ahmed, 2006). La procédure de test la plus courante est le test de production à débit constant.

Après stabilisation de la pression du réservoir, le puits est mis en production à débit constant et la pression est enregistrée. L'analyse de la courbe de rabattement et de la remontée de pression permet de déterminer la transmissivité du réservoir.

Dans un test de remontée de pression, l'analyse se porte sur l'enregistrement de la pression après l'arrêt de la production (si possible à débit constant). L'allure de la courbe de remontée de pression dépend des caractéristiques du réservoir (transmissivité) et du proche puits (effet pariétal ou *skin*).

Avantages et inconvénients des essais de formation

Outre l'estimation de la perméabilité à grande échelle (par l'enregistrement de la pression au réservoir pendant les essais de formation), le programme de métrologie présente l'avantage de pouvoir mesurer les paramètres du fluide (température, analyse d'eau) et une flowmétrie qui ne peuvent être effectuées que lorsque le puits est en cours de forage.

La principale restriction pour la réalisation des essais de formation est la nécessité d'une modification de l'architecture du puits pour isoler l'aquifère du Lusitanien des formations argileuses et marneuses sus et sous-jacentes. Au contact d'eau, ces formations s'hydratent et perdent leurs caractéristiques rhéologiques originelles. L'instabilité de la paroi du forage se détériore, augmentant fortement les risques de pertes du puits à la suite des essais.

La modification de l'architecture du puits nécessite d'isoler l'aquifère du Lusitanien par la descente du tubage 13"3/8 (habituellement positionné dans les formations du Portlandien) au toit des formations calcaires du Lusitanien pour protéger les formations du Kimméridgien. La protection des formations sous-jacentes (argiles de l'Argovien et de l'Oxfordien) pourrait être assurée par la réalisation des essais avant le forage des formations argileuses.

Malgré ces inconvénients et en raison des faibles volumes d'investigation des mini-DST et des risques - voire de la difficulté - de réaliser des DST dans des formations non protégées par un tubage (voir chapitres 2.2.2 et 2.2.3 suivants), les essais de formation restent préconisés.

2.2.2. Drill Stem Test (DST)

Les tests dits DST (Drill Stem Test) sont des opérations destinées à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un réservoir à savoir la pression statique et la perméabilité du terrain.

Le test est réalisé en cours de forage par descente (après retrait de la garniture et de l'outil de forage) d'une garniture de fond de puits équipée de deux *packers* et des enregistreurs de pression.

Après isolation de l'intervalle (généralement inférieur à 30 m), le puits est mis en production (par la pompe intégrée à la garniture de test) sur une courte période (inférieure à 1 h) et la pression est enregistrée. L'analyse des courbes de diminution et de remontée de pression permet de définir la perméabilité de l'intervalle testé.

Avantages et inconvénients des DST

Ce type de tests permet d'accéder à une première estimation de la perméabilité du réservoir sur l'intervalle testé pour permettre de s'assurer que la productivité du puits est satisfaisante. Parmi les inconvénients, les plus contraignants à la mise en place de ce type de test lors de la traversée d'un réservoir non cible pour le forage sont :

- le fait de devoir procéder à une manœuvre de la garniture de forage pour assembler la garniture de tests ce qui engendre une augmentation du temps de forage ;
- le faible volume du réservoir testé compte tenu de la durée et de la représentativité du test ;
- la nécessité de s'assurer que les formations du Kimméridgien et de l'Argo-Oxfordien ne soient pas en contact avec l'eau extraite de l'aquifère pour éviter l'hydratation des argiles et l'instabilité de la paroi du forage ;
- les conditions d'assurance TRC qui pourraient ne pas autoriser la réalisation d'une telle opération en raison des risques de coincement des *packers* en trou ouvert.

2.2.3. Mini-DST (mini- Drill Stem Test)

Afin de limiter les manœuvres de garniture de forage, récemment des outils « *Formation Tester* » descendus au câble de logging ont été développés pour procéder à des tests de production. L'outil est ancré à la paroi du forage et après ouverture des vannes, le fluide entre dans les chambres de tests. Durant le déplacement du fluide, la pression est enregistrée. Cet enregistrement se poursuit après le remplissage de la chambre (enregistrement de la remontée de pression) afin d'accéder à la perméabilité de la formation sur l'intervalle testé. Ce test peut être reproduit à plusieurs profondeurs.

Avantages et inconvénients des mini-DST

Ces tests sont moins coûteux que les Drill Stem Tests (DST classique), plus simples à mettre en œuvre, sans la nécessité de gérer les fluides en surface. L'inconvénient est le faible volume d'investigation (quelques pieds contre quelques dizaines de pieds pour les DST classique) et le faible débit de sollicitation.

2.3. MESURES SUR ÉCHANTILLONS DE ROCHE

2.3.1. Techniques de forages et échantillonnage

Quel que soit le type de forage réalisé, l'échantillonnage de roche constitue un élément essentiel pour la reconnaissance lithologique et structurale des formations géologiques traversées.

Dans le domaine du forage profond (forages pétroliers et géothermiques) deux principales techniques de forage sont utilisées : le forage destructif et le forage carotté. Or, selon que le forage soit destructif ou carotté, les échantillons de roches prélevés ne seront pas les mêmes, tout comme les mesures qui pourront être réalisées ainsi que les données qui en découlent (notamment pour la mesure de perméabilité).

a) Forage carotté, échantillonnage de carottes

Le forage carotté consiste à prélever un cylindre de roche, appelé « carotte », à l'aide d'un trépan annulaire rattaché au bout d'une tige de forage creuse. La continuité du prélèvement permet d'établir avec précision une coupe litho-stratigraphique du forage et d'accéder à des échantillons de roche intacts.

Lorsque les carottes obtenues sont relativement intactes (Figure 1), des échantillons plus petits, appelés *plugs* (mot anglais), peuvent être prélevés pour réaliser des mesures pétrophysiques spécifiques et ciblées comme celles de la porosité et de la perméabilité (Figure 1).

Le forage carotté demande plus de temps que le forage destructif et coûte plus cher, d'où le fait qu'il ne soit que très rarement utilisé dans le cadre des projets géothermiques. A notre connaissance, seul un forage géothermique réalisé à Aulnay-sous-Bois a fait l'objet d'un carottage au Dogger dans le bassin de Paris et aucun concernant le Lusitanien. Régulièrement utilisé par les pétroliers, l'intérêt du carottage pour améliorer la connaissance géologique des aquifères et déterminer les zones dites « réservoirs » n'est pourtant plus à prouver.



Figure 1 : Carotte issue d'un forage carotté au Trias (bassin de Paris) dans laquelle a été prélevé un échantillon (*plug*) pour réaliser une mesure de couple porosité/perméabilité.

b) Forage destructif, échantillonnage de déblais ou de mini-carottes

Le forage destructif consiste à traverser les terrains en imprimant, *via* le train de tiges, des efforts sur l'outil de forage dont l'action mécanique broie et déstructure les roches.

Deux méthodes de forage destructifs sont à distinguer

Le forage en rotation (« rotary » en anglais)

Une force procurée par un poids est appliquée sur un trépan à dents type tricône (Figure 2) ou monobloc type PDC, qui est mis en rotation. Le poids sur l'outil est appliqué par l'ajout de masses-tiges, prolongées jusqu'en surface par des tiges, l'ensemble constituant la garniture de forage. Un fluide de forage (boue) est injecté en continu à l'intérieur des tiges jusqu'au niveau de l'outil. Le fluide ressort de l'outil par des duses et circule ensuite de manière ascensionnelle dans l'espace annulaire (entre les parois du trou et l'extérieur du train de tiges) ce qui permet de remonter les déblais (*cuttings*) et de les extraire hors du trou.



Figure 2 : Trépan « tricône » utilisé dans le cadre des forages destructifs de type rotary.

Le forage par percussion (auss appelé « marteau fond de trou »)

Les efforts transmis à l'outil sont complétés par des chocs mécaniques imprimés au niveau de la tête de forage (marteau en tête où l'effort est transmis par le train de tiges) ou directement au niveau de l'outil (marteau fond de trou fonctionnant grâce à de l'air comprimé qui constitue dans ce cas le fluide de forage). Cette technique de forage est extrêmement efficace pour la traversée de roches dures.

Dans le cadre d'un forage géothermique au Dogger dans le bassin parisien, le forage rotary est actuellement le seul utilisé.

Deux types d'échantillons peuvent être obtenus à partir d'un forage destructif :

Les déblais (ou « *cuttings* » en anglais)

Ils correspondent aux résidus de roche broyée par l'action mécanique de l'outil de forage en fond de trou et remontés en surface par l'intermédiaire du fluide de forage. Leur taille varie de plusieurs millimètres à quelques centimètres (Figure 3).

L'analyse des déblais permet d'établir une coupe lithologique du forage sans toutefois être totalement représentative d'un point de vue stratigraphique puisque les échantillons de roche qu'ils représentent ont été brisés et remaniés lors de leur remontée à la surface.

L'échantillonnage des déblais est actuellement la méthode la plus courante employée dans le domaine de la géothermie profonde étant donné sa facilité de mise en œuvre et son moindre coût.

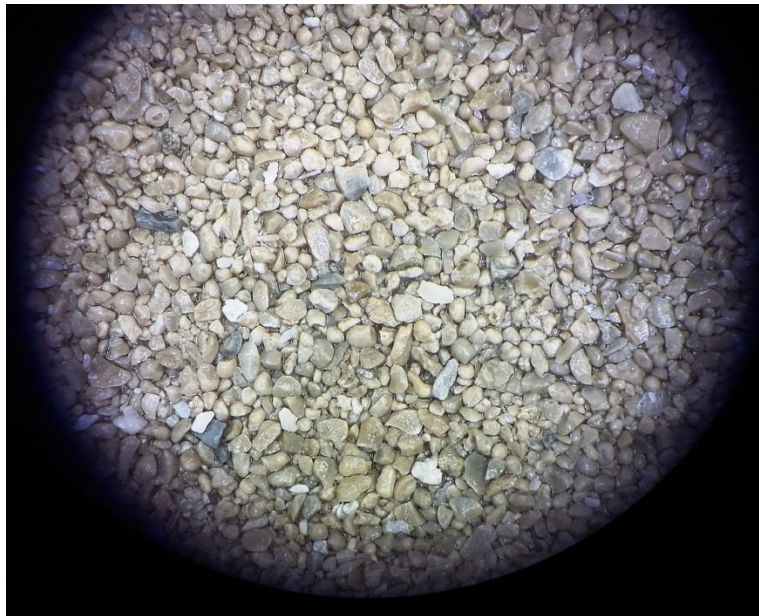


Figure 3 : Déblais issus d'un forage destructif (rotary) observés au travers d'une loupe binoculaire : fragments millimétriques de calcaires oolithiques du Lusitanien (forage Blanc Mesnil, bassin de Paris).

Les mini-carottes

Il s'agit d'échantillons de roche relativement intacte, comparables aux *plugs* prélevés sur les carottes des forages carottés (voir chapitre précédent). Ils sont prélevés par des outils descendus au câble de *logging*, en fin de forage destructif. Les outils prélèvent dans la paroi du forage des cylindres de roche pouvant atteindre 24 x 44 mm, soit par carottage latéral, soit par percussion, à des profondeurs ciblées (généralement identifiées par l'analyse des logs). Bien que partiel, les mini-carottes constituent un échantillonnage intéressant pour déterminer et caractériser les formations réservoirs.

Pour conclure, la technique d'échantillonnage de mini-carottes réalisée après le forage destructif (rotary) constitue un bon compromis entre l'échantillonnage idéal mais plus onéreux d'un forage entièrement carotté, et la récolte, certes moins coûteuse mais aussi géologiquement beaucoup moins représentative, des déblais issus d'un forage destructif.

2.3.2. Perméabilité sur carottes (plugs)

La perméabilité est une propriété du milieu poreux qui mesure la capacité et la faculté de la formation à transmettre le fluide. La perméabilité de la roche, K , est une propriété très importante car elle contrôle le mouvement et le débit du fluide dans le réservoir. Cependant, la roche peut être considérée comme homogène ou hétérogène selon l'échelle d'analyse. Ce concept d'échelle est donc fondamental car les valeurs de perméabilité *in-situ* peuvent être très différentes de celles mesurées en laboratoire, conséquence d'anomalies à grande échelle.

La perméabilité sur carotte est estimée en faisant passer un fluide de viscosité μ connue à travers un échantillon de carotte (*plug*) de dimension connue (A et L) ainsi qu'en mesurant le débit Q et la variation de pression Δp à partir de la loi de Darcy (Figure 4) :

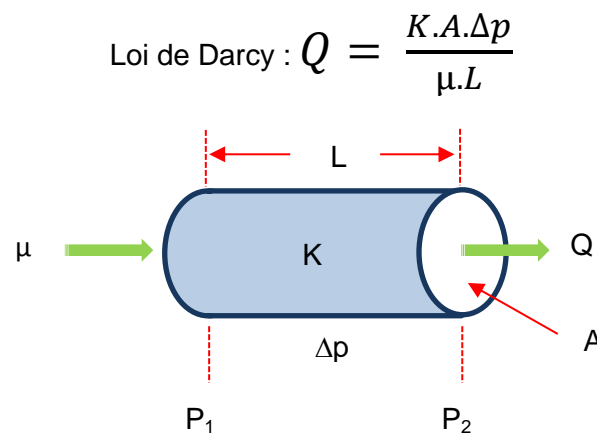


Figure 4 : Mesure de la perméabilité réalisée en laboratoire sur un échantillon de carotte (*plug*).

Les mesures sur carottes permettent de quantifier la perméabilité (K) et la porosité matricielle (PHI) de la roche à l'échelle de l'échantillon. À partir de ces mesures, une relation entre les couples de données porosité/perméabilité appelée « loi PHI-K » peut être établie. L'application de cette loi aux valeurs de porosités mesurées par diagraphie sur toute la longueur du forage permet de changer d'échelle (*up-scaling* en anglais) et d'en déduire la perméabilité matricielle des zones d'intérêt.

Cette technique d'analyse, fiable pour la détermination de la perméabilité de matrice, nécessite la mise à disposition d'échantillons intacts de roche de taille suffisante. Ces échantillons proviennent de roches prélevées par carottage de la formation, soit lors d'un forage carotté (*plugs*), soit à la suite d'un forage destructif (mini-carottes) (chapitre 2.3.1).

Avantages et inconvénients des mesures de perméabilité sur carotte (*plug*)

Comme détaillé précédemment, les mesures sur échantillons de roche sont rarement représentatifs des valeurs de perméabilité à l'échelle du réservoir, la perméabilité de fracture ne pouvant par exemple pas être prise en compte. Dans le cadre d'aquifères calcaires tels que le Lusitanien et le Dogger, les perméabilités mesurées sur carottes sont généralement plus faibles que les perméabilités issues de tests hydrauliques compte tenu des hétérogénéités rencontrées dans ce type d'aquifère (fractures, vacuoles, dissolution, ...).

Les mesures de perméabilité sur carotte présentent l'inconvénient majeur de devoir réaliser un forage carotté. Si ce dernier permet d'obtenir un échantillonnage intact et complet des formations traversées, il reste néanmoins plus coûteux qu'un forage destructif. Il est donc actuellement rare, dans le cadre d'un projet géothermique au Dogger, d'obtenir des carottes permettant de réaliser ce type de mesure.

2.3.3. Perméabilité sur déblais (cuttings)

Les déblais (*cuttings* en anglais) sont les fragments de roches remontés à la surface lors d'un forage destructif. Broyés et déstructurés par la progression de l'outil de forage en fond de trou, ils permettent néanmoins d'établir une description géologique succincte des formations traversées.

L'Institut Français du Pétrole (IFP) a développé une méthode pour estimer la perméabilité matricielle de ces déblais de forages. Environ 2 cm³ de *cuttings* de taille comprise entre 1 et 5 mm sont introduits dans la cellule de mesure. Une pompe connectée à la cellule remplit l'espace disponible avec une huile visqueuse. L'huile chasse l'air emprisonné dans les pores interconnectés et envahit aussi les *cuttings* par imbibition spontanée. La cellule est ensuite connectée à un second réservoir contenant de l'huile visqueuse à une pression de 10 bars et la pression et le débit d'injection sont mesurés. Le débit d'injection dépendant de la viscosité du fluide et de la perméabilité de la roche (d'après la loi de Darcy), la perméabilité de la matrice peut alors être estimée.

La méthode a été validée par l'IFP en comparant les calculs de perméabilités sur carottes et celles estimées par la méthode sur déblais. Les résultats montrent une très bonne corrélation entre les deux types de mesures.

Avantages et inconvénients des mesures de perméabilité sur déblais

Cette méthode demeure l'unique façon d'accéder à la perméabilité matricielle quand les carottes ne sont pas disponibles. La méthode présente cependant l'inconvénient de limiter l'estimation de la perméabilité à la gamme 0,01 à 100 milliDarcy. Or, les perméabilités recherchées pour un projet géothermique au Dogger ou au Lusitanien se situent bien au-delà de cette gamme (de 0,5 à 5 Darcy). De plus, la perméabilité réelle sera fortement sous-estimée dans les niveaux non cimentés tels que les calcaires oolithiques.

Tout comme pour les mesures sur carottes (*plugs*), les résultats sur déblais (*cuttings*) sont peu représentatifs de la perméabilité à l'échelle du réservoir mais peuvent quand même permettre d'établir une certaine relation entre la porosité et la perméabilité de matrice.

Les mesures de perméabilité sur déblais présentent l'avantage d'être réalisables à partir d'un forage destructif. Si les déblais récoltés présentent l'inconvénient d'être géologiquement moins représentatifs que les carottes, le forage destructif reste moins onéreux qu'un forage carotté.

2.3.4. Perméabilité sur mini-carottes

Hormis le forage carotté sur toute la longueur du Lusitanien, l'accès à des échantillons de carotte relativement intacts, peut être obtenu après un forage destructif. Des mini-carottes sont prélevées directement dans la paroi du forage, à intervalles plus ou moins réguliers ou ciblés.

La technique employée pour mesurer les perméabilités sur mini-carottes est identique à celle utilisée pour les *plugs* lors des forages carottés (voir chapitre 2.3.2).

Avantages et inconvénients des mesures de perméabilité sur mini-carottes

Les mesures de perméabilité (et porosité) réalisées sur mini-carottes présentent le net avantage d'être réalisables à partir d'un forage destructif (rotary), tout en donnant une bonne idée de la nature et de la structure des formations traversées (échantillons de roche intacte).

L'échantillonnage des mini-carottes constitue donc un bon compromis entre l'échantillonnage idéal mais plus onéreux d'un forage entièrement carotté, et la récolte, certes moins coûteuse mais aussi géologiquement beaucoup moins représentative, des déblais issus d'un forage destructif.

2.4. SÉLECTION ET HIÉRARCHISATION DES MÉTHODES ET PROPOSITION DE PROGRAMMES D'ACQUISITION

L'intérêt majeur d'acquérir des données lors d'un forage géothermique réside dans leur capacité à nous renseigner sur l'existence ou non d'un réservoir exploitable (débit, température du fluide géothermal ; transmissivité des roches, perméabilité, ...), sa géométrie (profondeur, épaisseur, extension, ... des niveaux producteurs), et sa nature (minéralisations, faciès lithologiques et structuraux, ...).

La logique de sélection et de hiérarchisation des méthodes de mesure sur forage présentées dans le Tableau 2 ci-après et détaillées dans le chapitre 1 de ce rapport, répond donc à des critères de pertinence et de représentativité des données recherchées vis-à-vis de la connaissance du réservoir géothermal.

Six programmes d'exploration permettant d'acquérir ces données ont alors été définis selon l'ordre de priorité suivant :

- **priorité 1 : essai de formation** (test de remontée de pression), intégrant les mesures de débitmétrie, de pression et de température de gisement, couplé à des mesures différées de **Porosité neutron** (nécessaire pour l'interprétation du test) ;
- **priorité 2 : mesures de perméabilité sur carottes** couplées à des mesures différées de **Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)** et de **Porosité neutron** ;
- **priorité 3 : mesures de perméabilité sur mini-carottes** prélevées par sonde, et mesures différées de **Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)** ;
- **priorité 4 : mesures de perméabilité sur déblais** et mesures différées de **Résonance Magnétique Nucléaire** ;
- **priorité 5 : mesures différées de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)**, de **Porosité neutron** et de **Sonique** ;
- **priorité 6 : mesures différées de Porosité neutron, Résistivité et Sonique.**

Donnée recueillie	Méthode / outils de mesure évalués et hiérarchisés en fonction de la pertinence des données recueillies	Combinaisons d'outils retenues par ordre de priorité					
		1	2	3	4	5	6
A Débit / Température	Essai de formation	X					
B Perméabilité / Porosité	Perméabilité sur carotte		X				
	Perméabilité sur mini-carottes relevées avec sonde			X			
	Perméabilité sur déblais				X		
	RMN différée		X	X	X	X	
C Porosité / Lithologie	Neutron (NPHI) différée	X	X	X	X	X	X
	Sonique différée				X	X	X
	Résistivité différée						X
D Lithologie / Structurale	Forage carotté		X				
	Mini-carottes			X			
	Déblais (tricône)				X		

Tableau 2 : Sélection et hiérarchisation des méthodes de mesures sur forage les plus pertinentes pour la géothermie basse énergie.

La mise en œuvre de ces 6 programmes d'exploration visant à acquérir de nouvelles données sur le réservoir potentiel du Lusitanien lors d'un forage géothermique au Dogger est détaillée dans le chapitre 0 de ce rapport. Ces programmes ont, de plus, été évalués au regard de leurs incidences technico-économiques sur l'opération de forage.

3. Évaluation technico-économique des programmes d'acquisition et analyse des risques

Suite à la hiérarchisation des méthodes de mesure sur forage, six programmes d'acquisition de données au Lusitanien en cours de forage au Dogger (bassin de Paris) sont analysés ci-dessous.

Pour chaque programme d'acquisition, cette analyse comporte de manière spécifique :

- le programme technique de forage (et/ou de tests). Afin d'alléger l'énumération des étapes successives de ces programmes et de n'en retenir que les différences majeures, les phases de forages communes à l'ensemble des programmes ont été regroupées dans un seul et même chapitre (chapitre 3.1.2) ;
- l'estimation du surcoût lié au volet exploratoire - le surcoût évalué ici l'est à un niveau de préfaisabilité et en date de janvier 2016, hors analyse et interprétation des données recueillies. À noter que l'indemnité actuellement versée par le Fonds de garantie au maître d'ouvrage en cas d'échec d'un forage au Dogger est une fraction du montant représentant 90 % du coût réel du forage, montant lui-même limité à 4 392 000 €. Nos estimations de surcoût seront donc basées sur ce montant de l'ordre de 4 millions d'euros, que l'on appellera dans ce rapport « coût classique » d'un forage au Dogger dans le bassin de Paris ;
- l'analyse des risques techniques et des verrous correspondants ;
- l'évaluation de la couverture assurantielle des risques induits par le programme d'acquisition sur le forage.

L'évaluation technico-économique et les risques associés à la mise en place de ces 6 programmes d'exploration du Lusitanien lors d'un forage ciblant le Dogger est synthétisée dans le Tableau 9 du chapitre 0.

3.1. PRÉAMBULE / AVANT-PROPOS

3.1.1. Réflexion sur une possible couverture assurantielle des risques spécifiques à la mise en place des programmes

Le présent rapport constitue un cahier des charges pour la connaissance du Lusitanien en vue de l'exploitation de cet aquifère tant comme alternative au Dogger dans les zones où ce dernier est très largement exploité, que pour alimenter des réseaux de chaleur associés à des bâtiments peu consommateurs d'énergie thermique.

La réalisation d'un tel programme d'investigation à l'occasion d'un forage au Dogger nécessitera en termes de responsabilité :

- d'effectuer une étude d'impact de ces travaux sur le puits et sur le milieu environnant pendant le temps de l'exploration de l'aquifère du Lusitanien et dans un délai de 2 mois après l'achèvement de ces travaux ;
- de garantir l'effacement de tous les impacts entraînés par les travaux supplémentaires ;
- de couvrir par une police d'assurance tous les risques inhérents aux travaux menés dans le puits sous la responsabilité d'un opérateur.

En termes de garantie, il semble indispensable :

- d'une part, de négocier avec la SAF-Environnement une extension de la garantie « Court Terme » assujettie aux risques géologiques liés à l'exploration du Lusitanien à l'occasion d'un forage au Dogger ;
- d'autre part, de disposer d'une assurance Tous Risques Chantier (TRC) adaptée aux risques évalués.

Quoi qu'il en soit, ce type de prestation de R&D devra être validé par les organismes publics en charge de la gestion et de la promotion des opérations de géothermie basse énergie, afin d'inscrire ces travaux dans l'objectif de développement maîtrisé de l'exploitation de l'aquifère du Lusitanien, et d'apporter les garanties suffisantes au maître d'ouvrage et à son représentant, ainsi qu'à la puissance publique.

Parmi les organismes qui seront sollicités, on peut noter :

- la DRIEE d'Île-de-France qui est garante de l'application du Code minier et de la préservation des formations hydrogéologiques sensibles au contact d'un forage profond ;
- le Comité technique du Fonds de garantie des forages profonds, géré par la SAF-Environnement, pour définir le statut, au regard de la couverture du risque pour ce type de travaux de R&D en reconnaissance du Lusitanien ;
- l'ADEME Île-de-France qui pourrait être sollicitée par le maître d'ouvrage ou son représentant pour le financement, via le Fonds chaleur, de tels travaux de R&D ;
- le Conseil régional d'Île-de-France.

L'objectif de ce chapitre est de lister les éléments indispensables à inscrire dans le contrat liant le Maître d'Ouvrage et l'opérateur et qui seront nécessaires à l'élaboration d'un contrat d'assurance TRC pour les programmes R&D associés à l'exploration du Lusitanien.

- **Souscripteur de l'assurance TRC** : *Nom du souscripteur (par exemple le Bureau d'Études ou l'Entreprise de forage). Le souscripteur peut aussi être le Maître d'ouvrage ou son délégataire s'ils sont intéressés par la connaissance de l'aquifère du Lusitanien en vue d'une opération ultérieure.*
- **Assurés** :
 - le souscripteur,
 - le Maître d'ouvrage, le Maître d'ouvrage délégué,
 - les entrepreneurs, leurs cotraitants et leurs sous-traitants,
 - plus généralement tout intervenant au chantier.

Il est entendu que l'assureur renonce à tous recours contre les intervenants, sauf faute lourde.

- **Biens assurés** : tous biens, machines, équipements, aménagements, matériels, produits consommables, ouvrages de toute nature objet du programme méthodologique d'exploration ou de matériel, ainsi que l'équipement complet du puits (tels que notamment les têtes de puits, tubage, etc.) dans lequel sera conduit le programme.
- **Nature des travaux** : Programme d'exploration retenu la reconnaissance du Lusitanien pouvant avoir des conséquences sur le puits et son environnement immédiat (plate-forme technique,...).
- **Durée prévisionnelle des travaux** : *Voir dans les 6 paragraphes intitulés « Estimation du surcoût lié au volet exploratoire » des 6 programmes proposés.*

- **Date d'effet du contrat d'assurance :** le jour de l'amenée du matériel et des équipements en tête de puits.
- **Date d'expiration du contrat d'assurance :** le jour du départ du matériel et des équipements après démontage.

- **Durée du contrat :**

Les garanties accordées par le contrat d'Assurance « Tous Risques Chantier » prennent effet le __/__/20__ et cessent le __/__/20__ à minuit.

Cependant, elles pourront être prolongées après accord préalable de l'assureur.

Pour ce faire, l'assuré fournira les motifs techniques ayant provoqué la prolongation des travaux.

Si l'assureur accepte de prolonger les garanties, une prime complémentaire sera déterminée le moment venu.

- **Définition d'un sinistre :** un sinistre est l'ensemble des dommages ou pertes de matériels susceptibles de mettre en jeu les garanties du contrat et la pérennité de l'ouvrage.

Tous dommages matériels, consécutifs à un même événement et/ou à une même cause technique et se produisant simultanément, constituent un seul et même sinistre.

À partir de ces éléments à prendre en compte dans tous les cas lors de la négociation avec les assureurs et leurs experts, chacun des 6 programmes d'investigation pour l'exploration du Lusitanien présente, dans un paragraphe spécifique intitulé « **Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage** », une évaluation des risques spécifiques au programme considéré, classés selon 2 niveaux de risques : majeur ou mineur.

3.1.2. Phases de forage communes à l'ensemble des programmes

Les phases de forage détaillées ci-dessous correspondent au programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger. Selon les programmes d'acquisition envisagés dans cette étude, seules les opérations intermédiaires correspondant aux phases 17''1/2 (pour le premier programme seulement) et 12''1/4 (pour les six programmes d'acquisition) sont affectées par le volet exploratoire ciblant le réservoir potentiel du Lusitanien.

Le programme ci-dessous reporte donc les phases de forage communes à l'ensemble des programmes d'acquisition.

La coupe technique suivante permet d'identifier les phases de forage par rapport aux différents étages géologiques (et à l'ordre de grandeur des profondeurs observées du toit de ces formations) et aux aquifères classiquement rencontrés dans les couches sédimentaires du Bassin Parisien. Il s'agit d'une coupe technique classique pour un forage au Dogger.

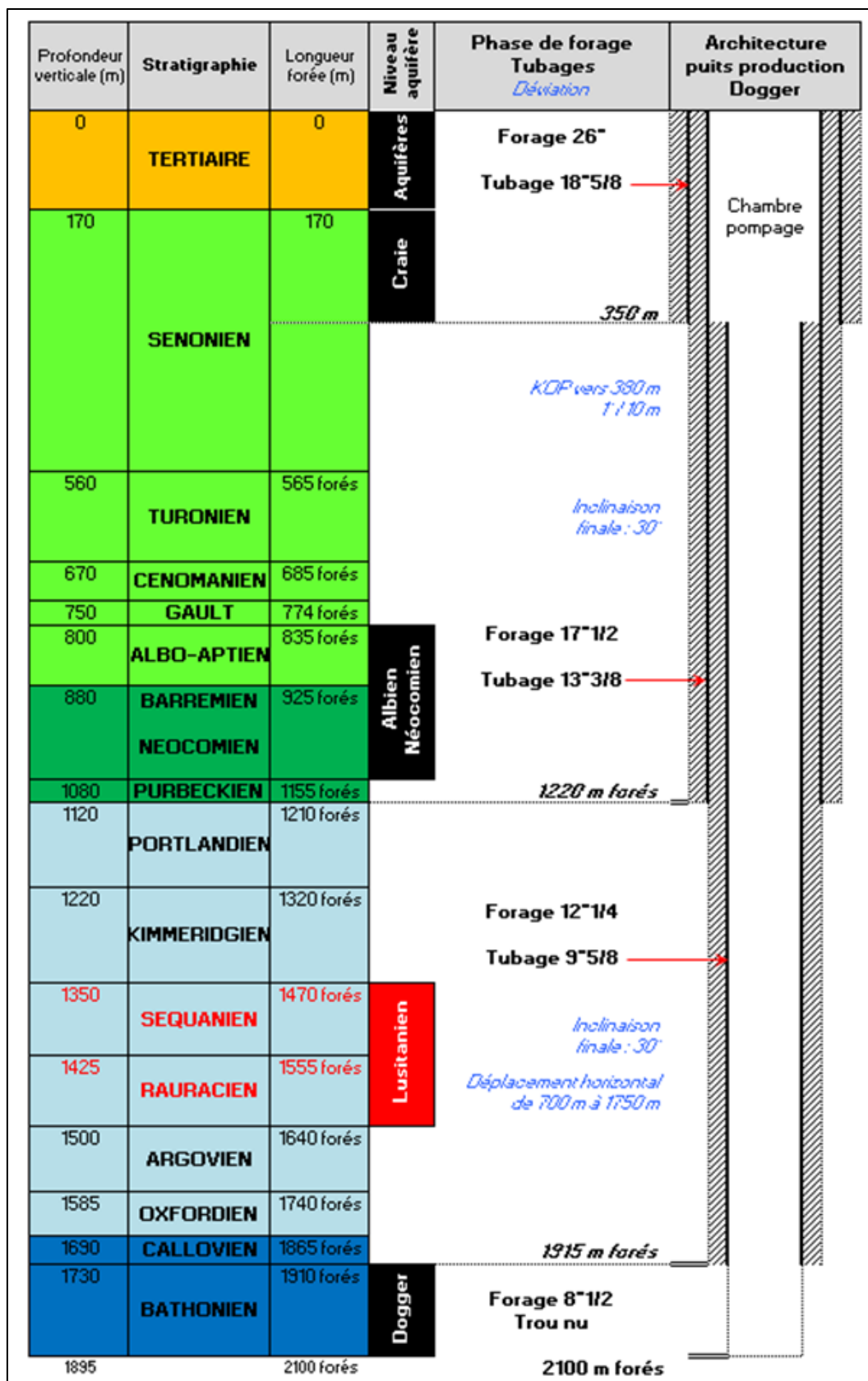


Figure 5 : Coupe géologique et technique pour un forage classique au Dogger.

Avant puits (0 m – environ 30 m)

Un tube guide d'un diamètre intérieur en général de 700 mm est mis en place à une profondeur d'environ 30 m, au moment de la réalisation du génie civil de la plate-forme. Ce premier tubage permet de couvrir les formations superficielles peu consolidées. Il est ancré dans des formations compétentes (roches dures) et cimenté à l'extrados sur toute sa hauteur.

Phase de forage 26" (30 m – craie du Sénonien (350 m environ))

Cette phase a pour objet de couvrir les formations tertiaires, de manière à en isoler les aquifères exploités dans les environs du site.

Cette phase comporte :

- le forage vertical en diamètre 26" (660 mm) jusqu'à environ 350 m de profondeur, dans la craie du Sénonien ;
- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone (nuance API K55 ou équivalent), de diamètre extérieur 18"5/8 (473 mm) et d'épaisseur minimale 9 mm ;
- la cimentation à l'extrados de ce tubage sur toute sa hauteur par injection sous pression d'un laitier de ciment.

Phase de forage 17"1/2 (craie du Sénonien (350 m environ) - Portlandien)

Cette phase permet de tuber complètement la phase de montée en inclinaison et d'assurer la protection de l'aquifère stratégique de l'Albien / Néocomien.

Cette phase de forage serait affectée par le premier programme d'acquisition seulement, qui comprend l'essai de formation du Lusitanien. Celui-ci induit un approfondissement de la phase de forage 17"1/2 jusqu'au toit du Séquanien, soit environ 400 m plus profond par rapport au programme classique ciblant le Dogger qui prévoit un arrêt de la phase au Portlandien. Le programme classique de cette phase comporte :

- le forage vertical en diamètre 17"1/2 (444,5 mm) sur environ 30 m (soit autour de 380 m) ;
- à la cote de 380 m, l'amorce de la déviation au moteur de fond avec un gradient d'augmentation de 1 à 1,5° tous les 10 m forés jusqu'à la stabilisation de l'angle (qui dépend de l'écartement entre les points d'impact) ;
- le forage en déviation stabilisée jusqu'à pénétration de quelques mètres dans le Portlandien ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray et diamètreur ;
- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone (nuance API K55 ou équivalent), de diamètre extérieur 13"3/8 (339,7 mm) ;
- la cimentation de ce tubage sur toute sa hauteur par injection sous pression d'un laitier de ciment. Le laitier aura une densité allégée entre la surface et le toit des argiles du Gault et une densité classique (généralement de 1,9) entre les argiles du Gault et le sabot du tubage.

Phase de forage 12"1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur, dont celles du Lusitanien (étages Séquanien et Rauracien) jusqu'au toit du réservoir du Dogger. Elle se termine classiquement par la mise en place du tubage 9"5/8.

Il s'agit donc de la phase qui concerne principalement le réservoir potentiel du Lusitanien. Le programme de forage associé au programme d'acquisition est systématiquement détaillé dans les programmes présentés ci-dessous.

Phase de forage 8"1/2 (forage et test du Dogger)

Cette phase comprend le forage de l'aquifère cible (Dogger) et sa mise en production selon la séquence suivante :

- le forage en diamètre 8"1/2 (215 mm) en déviation stabilisée jusqu'à la cote d'arrêt du forage ;
- l'enregistrement des diagraphies différées (Gamma-ray, diamétreur et porosité neutron) ;
- la mise en eau du puits et la réalisation des essais de fin de forage.

3.2. PROGRAMME 1 : ESSAIS DE FORMATION ET POROSITÉ NEUTRON DIFFÉRÉE

La solution la plus pertinente correspond à la réalisation d'essais de formation. Cette solution permettrait de déterminer la transmissivité du réservoir dans un rayon d'investigation de l'ordre du kilomètre autour du puits, mais aussi de mesurer la température du réservoir et la pression du gisement au puits.

3.2.1. Programme de forage et de test

La réalisation d'essais de formation sur l'aquifère du Lusitanien nécessite la modification de l'architecture du puits par rapport à un programme de forage classique ciblant le Dogger. Cette modification substantielle porte sur l'approfondissement de la phase 17"1/2 jusqu'au toit du Séquanien (plutôt qu'un arrêt au toit du Portlandien situé environ 400 m plus haut).

Cette modification tient compte des pressions de fracturation des formations lors des cimentations, de la pression de collapse des tubages employés.

Ce programme d'acquisition affecte donc le programme de forage commun (chapitre 3.1.2) pour les phases 17"1/2 et 12"1/4.

Phase de forage 17"1/2 (craie du Sénonien (350 m environ) – toit du Séquanien)

Cette phase permet de tuber complètement la phase de montée en inclinaison et d'assurer la protection de l'aquifère stratégique de l'Albien / Néocomien et **la couverture des formations marneuses du Kimméridgien.**

Cette phase comporte :

- le forage vertical en diamètre 17"1/2 (444,5 mm) sur environ 20 m (soit autour de 370 m) ;

- à la cote de 370 m, l'amorce de la déviation au moteur de fond avec un gradient d'augmentation de 1 à 1,5° tous les 10 m forés jusqu'à la stabilisation de l'angle (qui dépend de l'écartement entre les points d'impact) ;
- **le forage en déviation stabilisée jusqu'à pénétration de quelques mètres dans le Séquanien** ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray et diamètreur ;
- **la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone** (nuance API K55 ou équivalent), **de diamètre extérieur 13"3/8** (339,7 mm) avec une épaisseur minimale de 12 mm de 0 à 350 m (si le forage est un producteur) et de 10,6 mm sur le reste de la longueur ;
- **la cimentation de ce tubage sur toute sa hauteur** par injection sous pression d'un laitier de ciment. Le laitier aura une densité de 1,2 entre la surface et le toit des argiles du Gault et une densité de 1,9 entre les argiles du Gault et la base du Kimméridgien.

Phase de forage 12"1/4 (toit du Séquanien – toit du Bathonien) et test hydrogéologique du Lusitanien

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9"5/8.

Afin de procéder aux essais sur l'aquifère du Lusitanien, la phase de forage sera réalisée en deux étapes :

Forage de l'aquifère du Lusitanien

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée, **jusqu'à la base des calcaires du Rauracien** ;
- la remontée de la garniture de forage ;
- **la réalisation de diagraphies différées de Gamma-Ray, diamètreur et Porosité Neutron (NPHI)** ;
- la descente des tiges équipées d'un bull-nose jusqu'au fond du puits ;
- **la mise en eau du puits** ;
- la remontée des tiges au sabot du tubage 13"3/8 ;
- **la mise en production artésienne (ou par air-lift) du puits pendant 12 h** avec enregistrement des profils de température et de débitmétrie verticale puis le positionnement de la sonde de pression au sabot du tubage 13"3/8. En surface, des enregistrements du débit de production, de la température et de la pression annulaire seront réalisés (mise en place de la ligne d'essai réalisée en fin de phase de forage) ;
- **l'enregistrement pendant 12 h de la remontée de pression** après la fermeture du puits ;
- la remontée du matériel de diagraphie ;
- le contrôle de l'artésianisme du puits par saumurage si nécessaire ;
- la remontée des tiges de forages et la descente (**contrôle du trou**) de la garniture de forage ;
- **la remise en boue du forage** depuis le fond du puits.

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger.

Forage des formations de l'Argovien et de l'Oxfordien

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée, du toit des formations de l'Argovien jusqu'au toit du Bathonien ;
- la remontée de la garniture de forage ;
- la réalisation des diagraphies différées de Gamma-ray et de diamétreur ;
- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9"5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;
- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13"3/8 et de densité 1,2 jusqu'au toit du tubage).

3.2.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

Le surcoût de la réalisation d'essais sur l'aquifère du Lusitanien par rapport au coût classique du forage est présenté dans le tableau ci-après.

Estimation du surcoût pour la solution Essais de formation et Porosité Neutron	
Tubage (400 m de tubage 13"3/8)	50 000 €
Centralisation du tubage	10 000 €
Cimentation	30 000 €
Conditionnement de la boue	20 000 €
Société de vissage	10 000 €
Société de forage directionnel	20 000 €
Régie du <i>rig</i> et des sociétés de services	100 000 €
Surcoût diagraphie Porosité Neutron	15 000 €
Total	255 000 €

Tableau 3 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 1.

3.2.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

Ce programme d'acquisition intègre de manière préférentielle la réalisation d'un essai hydrogéologique (essai de la formation du Lusitanien), tel que pratiqué classiquement pour le Dogger (mise en eau du puits, phase de production puis test de remontée de pression) afin de déterminer la valeur de transmissivité du réservoir (et les valeurs associées de perméabilité et d'épaisseur productrice) la plus représentative possible. La durée globale des opérations liées au volet exploratoire du Lusitanien serait de l'ordre de 2 jours.

Le coût associé à ce programme jugé le plus pertinent, du point de vue de la donnée obtenue, est important puisque évalué à environ 6,4 % du montant garanti d'un forage au Dogger (base de référence prise à 4 M€ HT).

Son inconvénient est qu'il modifie profondément le programme de forage en introduisant **un risque supplémentaire lié à l'approfondissement de la phase de forage 17''1/2 d'environ 400 m, puis à la mise en place et la cimentation du tubage 13''3/8 au toit du Séquanien** afin de pouvoir tester le réservoir du Lusitanien tout en assurant la tenue des formations sus-jacentes (en particulier les marnes du Kimméridgien).

Les principales modifications et risques de ce programme concernent :

- La descente du tubage 13''3/8 à une profondeur de l'ordre de 1 400 à 1 500 m (au lieu de 1 000 m environ pour le programme classique s'arrêtant au toit du Portlandien) ;
- La nécessité de devoir disposer d'une machine de forage plus puissante (capacité liée au poids au crochet) que celles classiquement utilisées pour assurer la descente du tubage à cette profondeur ;
- L'incapacité de descendre ce tubage jusqu'à la profondeur visée.

Ce programme d'acquisition présente donc un risque majeur car pouvant engendrer la perte de l'ouvrage en cours de réalisation.

La réalisation d'un essai hydrogéologique classique reste donc un verrou qui ne peut actuellement être levé dans ce cadre d'opération et ce mode opératoire.

3.2.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu des risques opérationnels très importants, ce programme d'acquisition semble difficile à couvrir par une assurance spécifique dans le cadre d'une opération classique au Dogger. Néanmoins, ce type d'opération pourrait être envisagé dans le cadre de forages réalisés et financés par des projets de Recherche et Développement.

3.3. PROGRAMME 2 : PERMÉABILITÉ SUR CAROTTE, PERMÉABILITÉ RMN ET POROSITÉ NEUTRON DIFFÉRÉES

L'accès à des échantillons de roches pour estimer la perméabilité des formations nécessite le carottage des formations carbonatées du Lusitanien. Le programme ci-dessous détaille les opérations qui concernent spécifiquement la phase 12''1/4 du forage.

3.3.1. Programme de forage

Phase de forage 12''1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9''5/8. **Elle comprend le carottage du Lusitanien sur toute la longueur :**

- le forage en diamètre 12''1/4 (311 mm) en déviation stabilisée, jusqu'à pénétration de quelques mètres jusqu'à la base des formations du Kimméridgien ;
- la remontée de la garniture de forage ;
- **la descente de la garniture de carottage équipée d'un moteur de fond et de l'équipement de contrôle de trajectoire ;**

- **le carottage de formations carbonatées du Lusitanien (Séquanien et Rauracien) sur toute leur longueur (vitesse d'avancement d'environ 30 m/jour) en déviation stabilisée ;**
- **la remontée de la garniture de carottage ;**
- **la descente de la garniture de forage dirigé 12"1/4 ;**
- **le réalésage en diamètre 12"1/4 (311 mm) de la section carottée puis le forage jusqu'au toit du Bathonien ;**
- **la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray, diamètreur, porosité neutron et résonance magnétique nucléaire.**

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger ;

- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9"5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;
- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13"3/8 et de densité 1,2 jusqu'au sommet du tubage).

3.3.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

La solution du carottage apparait comme une solution extrêmement coûteuse compte tenu du temps nécessaire au carottage de l'intégralité de l'aquifère du Lusitanien (Tableau 4).

Estimation du surcoût pour la solution Perméabilité sur carotte, RMN et Porosité Neutron	
Location matériel de carottage et de déviation	100 000 €
Régie du <i>rig</i> et des sociétés de services (10 jours)	500 000 €
Carottier	50 000 €
Surcoût diagraphies RMN et Porosité Neutron	40 000 €
Mesure de perméabilité sur carotte	30 000 €
Total	720 000 €

Tableau 4 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 2.

3.3.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

À défaut de pouvoir réaliser un essai hydrogéologique plus représentatif (programme 1), ce programme d'acquisition intègre une phase de carottage au niveau de l'aquifère du Lusitanien qui permet d'obtenir une information directe et complète de la lithologie du réservoir. Des tests sur ces prélèvements peuvent être réalisés afin de déterminer une valeur de perméabilité sur toute la hauteur du réservoir. Le rayon d'investigation étant limité au rayon du puits, la représentativité de ce paramètre est d'un niveau d'intérêt scientifique

inférieur par rapport à la connaissance plus grande du réservoir visée par le programme d'acquisition précédent.

Le coût associé à ce programme est extrêmement important puisque évalué à environ 18 % du montant garanti d'un forage au Dogger (base de référence prise à 4 M€ HT) ce qui en fait son principal inconvénient, sachant en outre que le risque technique lié à l'opération de carottage ne peut être nul (difficulté de réalisation, durée de l'opération, mauvais taux de récupération d'une carotte, ...).

Le risque opérationnel lié au coincement du carottier ne peut également pas être ignoré. Ce risque pourrait, dans le pire des cas, conduire à la perte de l'ouvrage en cours de réalisation.

Le risque majeur serait probablement lié à la durée de réalisation très importante du carottage, estimée à une dizaine de jours. Le facteur temps joue en défaveur de ce programme en raison des difficultés techniques pouvant survenir à tout moment (défaillance humaine, matériel, ...) sur des éléments clés du forage tel que le conditionnement de la boue (tenue des parois du trou nu entre le Portlandien et le Séquanien, dont les marnes du Kimméridgien) ou le maintien de la trajectoire du forage par exemples.

3.3.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu du coût de l'opération extrêmement important (720 k€ HT) et des risques opérationnels qu'elle engendre sur le forage, principalement à cause de sa durée très importante (10 jours), il est très peu probable que ce programme d'acquisition puisse être couvert par une assurance spécifique dans le cadre d'une opération classique au Dogger. Néanmoins ce type d'opération pourrait être envisagé dans le cadre de projets de Recherche et Développement.

On peut donc considérer que ce programme présente un **niveau de risques majeur**.

3.4. PROGRAMME 3 : PERMÉABILITÉ SUR MINI-CAROTTE, PERMÉABILITÉ RMN ET NEUTRON DIFFÉRÉES

La troisième solution proposée consiste à sélectionner, à partir des diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (estimation de la perméabilité), les zones d'intérêt où des prélèvements de mini-carottes pourraient être réalisés.

3.4.1. Programme de forage

Le programme de forage serait impacté au niveau de la phase 12"1/4 seulement.

Phase de forage 12"1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9"5/8 :

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée, jusqu'à toit du Bathonien;
- le conditionnement de la remontée de la garniture de forage ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray, diamètreur **Résonance Magnétique Nucléaire et Porosité Neutron** ;
- **le prélèvement des échantillons (mini-carottes) aux profondeurs définies par les résultats du log de Résonance Magnétique Nucléaire.**

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger avec, en fin de phase 12''1/4, les opérations suivantes :

- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9''5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;
- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13''3/8 et de densité 1,2 jusqu'au sommet du tubage).

3.4.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

Les coûts estimatifs pour le prélèvement d'échantillons de roche au câble et la mesure de perméabilité sur ces mini-carottes sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Estimation du surcoût pour la solution Perméabilité sur mini-carottes, RMN et Porosité Neutron	
Surcoût diagraphies RMN et Porosité Neutron	40 000 €
Carottage par sonde au câble (pour 10 échantillons)	50 000 €
Prix par échantillon supplémentaire 2500 €	(+ 2 500 € si nécessaire)
Régie du <i>rig</i> et des services associés (1/2 journée)	25 000 €
Perméabilité sur carotte	10 000 €
Total	125 000 € (+ 2 500 € par éch. supplémentaire si nécessaire)

Tableau 5 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 3.

3.4.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

À défaut de pouvoir réaliser un essai hydrogéologique plus représentatif (programme 1), ou un carottage sur toute la hauteur du réservoir potentiel (programme 2), ce troisième programme d'acquisition propose la réalisation de 10 mini-carottes prélevées dans le réservoir à des niveaux préalablement ciblés.

Cette technique permettrait d'obtenir une information directe de la lithologie du réservoir mais incomplète par rapport à la technique précédente (carottage de toute la hauteur du réservoir).

Des tests réalisés sur les mini-carottes permettraient de déterminer une valeur de perméabilité, dont la représentativité à l'échelle du réservoir serait moindre par rapport aux deux programmes précédents, puisque limitée aux volumes des échantillons prélevés représentant quelques cm³ du réservoir seulement.

Le coût associé à ce programme représente environ 3,1 % du montant garanti d'un forage au Dogger (base de référence prise à 4 M€ HT), ce qui est nettement inférieur aux deux programmes d'acquisition précédents (programmes 1 et 2, respectivement 6,4 % et 18 %).

Le risque technique lié à l'opération de carottage au câble est nettement inférieur au risque lié au carottier (coincement) mis en œuvre nécessairement dans le programme précédent (cf. programme 2).

La durée du programme d'acquisition est rapide (estimée à 12 heures), ce qui réduit le risque lié à l'opération de forage en cours, et à la tenue des parois du trou dans les sections non couvertes par un tubage (marnes du Kimméridgien notamment).

En cas de perte de l'outil en fond de puits (rupture du câble), une opération de repêchage (Fishing) pourrait être entreprise avec un risque modéré d'échec, corrélé à un risque très faible de perte du puits en cours de réalisation.

Le risque principal correspondant à ce programme d'acquisition pourrait donc être essentiellement un risque technique lié à un mauvais échantillonnage du réservoir faussant la représentativité de la valeur de la perméabilité du réservoir à l'échelle du puits.

Ce programme n° 3 présente donc **un risque mineur**.

3.4.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu de la nature du risque opérationnel (perte d'outil et opération de repêchage), ce programme d'acquisition pourrait être couvert par une assurance spécifique définie par :

- un état du puits avant de commencer l'opération, comprenant un contrôle de trou et le relevé des caractéristiques du fluide de forage (densité, viscosité, etc...) ;
- l'établissement du montant des outils descendus dans le puits pour le programme d'acquisition (risque de détérioration des outils en cas de perte dans le puits et de repêchage) ;
- l'établissement du montant des opérations de Fishing pour 24 heures et du coût environné de la machine de forage et de l'ensemble de ses équipements ;
- un état du puits final en fin d'opération d'exploration avec un nouveau contrôle de trou et le conditionnement éventuellement nécessaire à la restauration des caractéristiques du fluide de forage pour la reprise du forage.

3.5. PROGRAMME 4 : PERMÉABILITÉ SUR DÉBLAIS, PERMÉABILITÉ RMN , POROSITÉS NEUTRON ET SONIQUE DIFFÉRÉES

À défaut d'échantillon intact de roche, des mesures de perméabilité peuvent être réalisées sur les déblais de forage. La solution détaillée ci-dessous propose la réalisation de mesures de perméabilité sur les déblais de forage qui seront comparés aux perméabilités issues du log de résonance magnétique nucléaire. Le couplage des mesures de perméabilité sur déblais et de résonance magnétique nucléaire permettra d'établir une relation liant la perméabilité matricielle de la roche et les mesures de perméabilités issues du log RMN.

3.5.1. Programme de forage

Phase de forage 12"1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9"5/8 :

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée jusqu'à toit du Bathonien. **Pour maximiser la taille des cuttings, la traversée du Lusitanien devant s'effectuer avec un outil de type tricône, deux remontées de garniture de forage devront être réalisées pour le changement de l'outil de forage** (PDC jusqu'à la base du Kimméridgien, tricône pour la traversée du Lusitanien et PDC jusqu'au toit du Bathonien). Les déblais des formations du Lusitanien seront conservés et des mesures de perméabilités seront réalisées sur les échantillons sélectionnés ;
- la remontée de la garniture de forage ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray, diamètreur, **Porosité Neutron Sonique compensé et Résonance Magnétique Nucléaire.**

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger avec, en fin de phase 12"1/4, les opérations suivantes :

- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9"5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;
- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13"3/8 et de densité 1,2 jusqu'au sommet du tubage).

3.5.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

Le surcoût par rapport au forage classique correspond au coût de la diagraphie, au temps d'immobilisation du *rig* pendant la mesure RMN et au coût des analyses.

Estimation du surcoût pour la solution perméabilité sur déblais, RMN et Porosité Neutron	
Surcoût diagraphies RMN, Porosité Neutron, et Sonique compensé	55 000 €
Régie du <i>rig</i> et des services associés (2 journées)	100 000 €
Perméabilité sur déblais	10 000 €
Total	165 000 €

Tableau 6 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 4.

3.5.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

À défaut de pouvoir réaliser un essai hydrogéologique plus représentatif (programme 1), ou un carottage sur toute la hauteur du réservoir potentiel (programme 2) ou à des niveaux préalablement ciblés (programme 3), ce quatrième programme d'acquisition viserait à déterminer la valeur de perméabilité du réservoir à partir des déblais du forage.

Cette technique permettrait d'obtenir une information indirecte de la lithologie du réservoir car remaniée par la remontée des déblais dans l'espace annulaire en cours de forage.

La représentativité de la perméabilité serait limitée aux volumes des échantillons prélevés, représentant quelques m³ du réservoir, et incertaine par le remaniement et la déstructuration potentielle des déblais comparativement aux programmes de carottage.

Le coût associé à ce programme représente environ 4,9 % du montant garanti d'un forage au Dogger (base de référence prise à 4 M€ HT) ce qui est nettement inférieur aux deux premiers programmes d'acquisition (programmes 1 et 2, respectivement 6,4 % et 18 %) et du même ordre de grandeur que le surcoût lié au programme d'acquisition précédent (cf. programme 3 : carottage au câble).

Le risque technique relatif à ce programme est lié au changement d'outil requis (tricot à la place d'un outil PDC) pour obtenir une taille des déblais de forage suffisante. Ce changement introduit un risque technique correspondant à une baisse de performance de l'opération de forage (vitesse d'avancement, trajectoire du puits) et donc un risque en termes de responsabilités, en cas de défaillance majeure (casse de l'outil, bouchage des duses, mauvais nettoyage du puits, ...) conduisant à la perte du puits dans le pire des cas.

Compte tenu du risque opérationnel lié au changement d'outil, ce programme d'acquisition comporte un risque assez important.

Le risque opérationnel est donc par conséquent nettement plus important que les risques induits par le programme d'acquisition précédent, ce qui confère à ce **programme n° 4 un risque majeur**.

3.5.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu du risque opérationnel lié au changement d'outil, il est très peu probable que ce programme d'acquisition puisse être couvert par une assurance spécifique.

3.6. PROGRAMME 5 : PERMÉABILITÉ RMN, POROSITÉS NEUTRON ET SONIQUE DIFFÉRÉES

La solution proposée consiste à la réalisation de diagraphie différée à la fin de la phase 12"1/4. Les différentes diagraphies réalisées permettront d'établir une relation entre la porosité et la perméabilité RMN.

3.6.1. Programme de forage

Phase de forage 12"1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9"5/8 :

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée jusqu'à toit du Bathonien ;

- la remontée de la garniture de forage ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray, diamètreur, **de Porosité Neutron, de Sonique compensé et de Résonance Magnétique Nucléaire.**

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger avec, en fin de phase 12"1/4, les opérations suivantes :

- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9"5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;
- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13"3/8 et de densité 1,2 jusqu'au sommet du tubage).

3.6.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

Le surcoût correspond aux diagraphies complémentaires réalisées sur la phase 12"1/4 et au coût d'immobilisation du *rig* pendant 12h pour réaliser les mesures.

Estimation du surcoût pour la solution diagraphie de porosité, RMN et sonique	
Surcoût diagraphies RMN, Porosité Neutron et Sonique	55 000 €
Régie du <i>rig</i> et des services associés (1/2 journée)	25 000 €
Total	80 000 €

Tableau 7 - Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 5.

3.6.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

À défaut de pouvoir réaliser un essai hydrogéologique plus représentatif (programme 1), ou des mesures de perméabilité sur carottes (programme 2), ou mini-carottes (programme 3) ou déblais (programme 4), ce cinquième programme d'acquisition viserait à déterminer la valeur de perméabilité du réservoir à partir des diagraphies couplées.

Cette technique ne permettrait pas d'obtenir une information directe concernant la lithologie du réservoir (pas de carottage). Néanmoins les déblais de forage (avec un outil PDC) échantillonnés classiquement en cours de forage, ou de manière plus resserrée en fonction du suivi des paramètres de forage par exemple (variation de la vitesse d'avancement à paramètres de forage constants, traduisant la présence de niveaux plus ou moins poreux) doivent permettre de corréler les données obtenues par diagraphies aux observations des déblais à la loupe binoculaire (porosité matricielle par exemple pour des calcaires oolithiques).

La perméabilité du réservoir serait évaluée par l'interprétation de diagraphies complémentaires, Résonance Magnétique Nucléaire et Sonique, d'un point de vue qualitatif (perméabilité matricielle / perméabilité de fracture) et quantitatif (résolution verticale / profondeur d'investigation).

Le coût associé à ce programme représente environ 1,7 % du montant garanti d'un forage au Dogger (base de référence prise à 4 M€ HT) ce qui correspond à un montant

peu élevé par rapport à l'ensemble des programmes d'acquisition. L'autre avantage principal de ce programme est qu'il est comparativement très rapide à mettre en œuvre (durée estimée à 6 heures), ce qui réduit le risque lié à l'opération de forage en cours.

Le risque technique majeur lié à ce programme de diagraphies est limité au risque de perte d'outil(s) en fond de puits (rupture du câble). Une opération de repêchage (Fishing) pourrait être entreprise avec un risque modéré d'échec, corrélé à un risque très faible de perte du puits en cours de réalisation.

Ce programme n° 5 présente donc **un risque mineur**.

3.6.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu de la nature du risque opérationnel (perte d'outil et opération de repêchage), ce programme d'acquisition pourrait être couvert par une assurance spécifique définie par :

- un état du puits avant de commencer l'opération, comprenant un relevé des caractéristiques du fluide de forage (densité, viscosité, etc.) ;
- l'établissement du montant des outils descendus dans le puits pour le programme d'acquisition (risque de détérioration des outils en cas de perte dans le puits et de repêchage) ;
- l'établissement du montant des opérations de Fishing pour 24 heures et du coût environné de la machine de forage et de l'ensemble de ses équipements ;
- un état du puits final en fin d'opération d'exploration avec le conditionnement éventuellement nécessaire à la restauration des caractéristiques du fluide de forage pour la reprise du forage.

3.7. PROGRAMME 6 : POROSITÉS NEUTRON, SONIQUE ET RÉSISTIVITÉ DIFFÉRÉES

La solution proposée consiste à la réalisation de diagraphies différées à la fin de la phase 12"1/4. À défaut de mesure de perméabilité, les diagraphies de Porosité Neutron, Sonique et Résistivité permettront de localiser les zones les plus favorables à la production.

3.7.1. Programme de forage

Phase de forage 12"1/4 (toit du Portlandien – toit du Bathonien)

Cette phase comprend le forage des formations du Jurassique supérieur jusqu'au toit du réservoir du Dogger pour s'achever par la mise en place du tubage 9"5/8 :

- le forage en diamètre 12"1/4 (311 mm) en déviation stabilisée jusqu'à toit du Bathonien ;
- la remontée de la garniture de forage ;
- la réalisation de diagraphies différées de Gamma-ray, diamétreur, de **porosité Neutron, de Sonique compensée et de Résistivité**.

Le forage pourra ensuite reprendre selon le programme classiquement mis en œuvre pour les forages au Dogger avec, en fin de phase 12"1/4, les opérations suivantes :

- la mise en place dans le trou d'un tubage en acier au carbone de diamètre extérieur 9"5/8 (244,5 mm) et d'épaisseur minimale 12 mm ;

- la cimentation de ce tubage par injection sous pression d'un laitier de ciment (de densité 1,9 jusqu'au sabot du tubage 13"3/8 et de densité 1,2 jusqu'au sommet du tubage).

3.7.2. Estimation du surcoût lié au volet exploratoire

Le surcoût correspond aux diagraphies complémentaires réalisées sur la phase 12"1/4 et au coût d'immobilisation du *rig* pendant les diagraphies.

Estimation du surcoût pour la solution diagraphie de porosité, sonique et résistivité	
Surcoût diagraphies Porosité Neutron, Sonique et Résistivité	45 000 €
Régie du <i>rig</i> et des services associés (1/4 journée)	12 500 €
Total	57 500 €

Tableau 8 : Estimation du surcoût de mise en œuvre du programme 6.

3.7.3. Analyse des risques techniques et verrous correspondants

Ce programme d'acquisition ne permettrait pas d'obtenir une information directe concernant la lithologie du réservoir (les déblais classiques du forage resteraient néanmoins exploitables), ni de déterminer une valeur de perméabilité du réservoir.

Peu onéreux (environ 1,4 % du montant garanti d'un forage au Dogger, base de référence prise à 4 M€ HT et rapide à mettre en œuvre (durée estimée à 6 heures), ce programme d'acquisition est limité par le faible intérêt des données obtenues (porosité, perméabilité de fracture et résistivité) assez peu exploitables pour la conception de nouveaux dispositifs,

Le principal risque technique lié à ce programme de diagraphies est limité au risque de perte d'outil(s) en fond de puits (rupture du câble). Une opération de repêchage (Fishing) pourrait être entreprise avec un risque modéré d'échec, corrélé à un risque très faible de perte du puits en cours de réalisation.

De ce fait, l'importance du risque associé à ce programme d'investigation n° 6 peut être considéré comme **faible**.

3.7.4. Évaluation de la couverture assurantielle des risques spécifiques au forage

Compte tenu de la nature du risque opérationnel (perte d'outil et opération de repêchage), ce programme d'acquisition pourrait être couvert par une assurance spécifique définie, mais son intérêt limite les raisons de le mettre en œuvre.

3.8. TABLEAU DE SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE ET DES RISQUES ASSOCIÉS

Pour acquérir, au passage, des données sur l'aquifère méconnu du Lusitanien, lorsqu'un nouveau forage géothermique au Dogger sera réalisé dans le bassin de Paris, six programmes d'acquisition de données basées sur des méthodes de forage éprouvées ont été détaillés et analysés dans les chapitres 3.1 à 3.7 précédents.

L'intérêt en termes de données acquises, les surcoûts et risques engendrés et le temps afférents à la mise en place de ces programmes sont synthétisés dans le Tableau 9 ci-après.

Programme	Méthode	Mesures	Surcoût + (% du coût « classique » d'un forage au Dogger)	Durée	Risque
1	Essai de formation + Porosité Neutron	Débitmétrie (niveaux producteurs) + Pression et Température gisement + Transmissivité (épaisseur productrice/ perméabilité) + Porosité totale	255 k€ HT (6,4 %)	2 jours	Majeur : modification de l'architecture du puits (responsabilité)
2	Carotte + Log RMN + Porosité Neutron	Perméabilité sur carotte + Log de perméabilité + Porosité totale	720 k€ HT (18 %)	10 jours	Majeur : durée de l'opération + coincement carottier
3	Mini-carottes + Log RMN + Porosité Neutron	Perméabilité sur mini-carottes + Log de perméabilité + Porosité totale	125 k€ HT (3,1 %)	12 heures	Mineur : mauvais échantillonnage + perte d'outil (Fishing)
4	Déblais + Log RMN + Porosité Neutron	Perméabilité sur déblais (cuttings) + Log de perméabilité	165 k€ HT (4,1 %)	2 jours	Majeur : forage Lusitanien avec changement d'outil (responsabilité)
5	Logs RMN + Porosité Neutron + Sonique	Log de perméabilité + Porosité totale + Perméabilité de fracture	80 k€ HT (2 %)	12 heures	Mineur : perte d'outil (Fishing)
6	Porosité Neutron + Résistivité + Sonique	Porosité totale + Résistivité + Perméabilité de fracture	57,5 k€ HT (1,4 %)	6 heures	Mineur : perte d'outil (Fishing)

Tableau 9 : Évaluation technico-économique des programmes d'acquisition retenus et analyse des risques.

4. Conclusion et recommandations

Dans un premier temps, différentes méthodes de mesures, éprouvées dans le domaine du forage profond et actuellement disponibles sur le marché, sont détaillées et analysées dans ce projet. Onze d'entre elles ont alors été sélectionnées et hiérarchisées selon des critères de pertinence vis-à-vis de la donnée mesurée, dans l'ordre suivant :

- l'essai de formation (test hydrogéologique) : il permet d'estimer la transmissivité de l'aquifère et sa productivité. Le débit est le seul paramètre qui permette d'évaluer l'exploitabilité d'un aquifère ;
- les mesures de perméabilité sur carottes, mini-carottes ou déblais, et la diagraphie différée de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) : elles permettent d'estimer la perméabilité matricielle de l'aquifère et de fait, d'identifier les zones de l'aquifère, potentiellement productrices ;
- les mesures de porosité à partir des diagraphies différées Neutron, Sonique et Résistivité : elles permettent d'estimer la porosité de l'aquifère et donc sa capacité à contenir de l'eau sans pour autant que celle-ci soit mobilisable pour une exploitation ;
- l'échantillonnage de roche (carottes, mini-carottes et déblais) : il permet d'établir le log lithologique des formations et ainsi de reconnaître les faciès perméables, mais aussi de recalculer en profondeur l'ensemble des données issues des diagraphies.

À partir de cette sélection, six programmes d'acquisition de données ont été élaborés et classés par ordre de priorités. Ils proposent une combinaison de méthodes de mesures sur forage permettant d'améliorer, au mieux, la connaissance géothermique des réservoirs carbonatés tels que le Lusitanien et le Dogger du bassin de Paris.

Ces programmes d'acquisition de données ont alors fait l'objet d'une description technique détaillée, d'une estimation de leur surcoût par rapport à un forage géothermique « classique », d'une analyse des risques techniques et verrous correspondants, ainsi que d'une réflexion sur la couverture assurantielle susceptible de prendre en charge ces risques.

Ainsi, le programme n° 1 s'applique à un forage destructif de type rotary. Il consiste à réaliser un essai de formation associé à une diagraphie différée de Porosité Neutron. S'il est le plus pertinent en termes de données récoltées (débit, pression, température, perméabilité et épaisseur productrice), sa mise en œuvre s'avère la plus risquée des programmes proposés ici car elle nécessite de modifier l'architecture du puits. Son surcoût est parmi les deux plus élevés (environ 6,4 % du prix « classique » d'un forage au Dogger).

Le programme n° 2 prévoit des mesures de perméabilité sur carotte associées à des diagraphies différées de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et de Porosité Neutron. Il nécessite de réaliser un forage carotté sur toute l'épaisseur de l'aquifère, ce qui augmente considérablement le prix de revient, la durée de l'opération de forage et le risque de coincement du carottier (risque technique majeur). Évalué à plus de 720 k€ HT, le surcoût engendré par la mise en place de ce programme est le plus élevé des six programmes. Il représente au moins 18 % du coût d'un forage « classique » au Dogger.

Le programme n° 3 s'appuie sur une technique récente d'échantillonnage de mini-carottes dans les parois du puits une fois le forage destructif réalisé (rotary). Elle permet d'obtenir des mesures de perméabilité sur roche intacte (mini-carottes) que l'on associe ensuite à des diagraphies différées de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et de Porosité Neutron.

Le surcoût raisonnable de mise en place de ce programme (3,1 % d'un forage « classique » au Dogger), associé à un risque technique mineur lié à la possible perte d'outils de mesure, font de ce programme un bon compromis.

Le programme n° 4 vise à acquérir des mesures de perméabilité sur roche à partir des déblais des forages destructifs (rotary) associé à des diagraphies différées de Résonance Magnétique Nucléaire et de Porosité Neutron. D'un surcoût raisonnable, proche de celui du programme n° 3 (4,1 % d'un forage « classique » au Dogger), ce programme comporte cependant un risque technique majeur lié au changement d'outils durant l'opération de forage.

Le programme n° 5 n'est basé que sur des mesures de diagraphies différées en fin de forage destructif (rotary) et ne prévoit pas de mesure de perméabilité directe sur échantillons (carottes, mini-carottes ou déblais). Ce programme est donc moins cher que le programme n° 3 mais présente un intérêt scientifique moindre pour un risque opérationnel équivalent.

Enfin, le programme n° 6, constitue le minimum requis pour acquérir des données sur le Lusitanien dans le cadre d'un forage géothermique au Dogger. Certes le moins onéreux (1,4 % du prix d'un forage « classique » au Dogger, soit environ 57,5 k€), le moins long (6 heures) et peu risqué (perte d'outils = risque mineur), il reste cependant le moins satisfaisant en termes d'apport de connaissances géologiques et géothermiques sur l'aquifère du Lusitanien.

Si le classement de ces programmes est clairement identifié en termes de pertinence des données recueillies et de surcoût engendré, les risques techniques et assurantiels s'avèrent, quant à eux, plus délicats à hiérarchiser. Nous retiendrons cependant que le programme n° 3 (Perméabilité sur mini-carottes et Log RMN) constitue probablement un bon compromis entre les tests hydrogéologiques, les plus pertinents pour déterminer la productivité de l'aquifère mais techniquement très risqués, les mesures sur forage carotté représentatif de l'aquifère mais très onéreux, les mesures sur déblais moins intéressantes car géologiquement déstructurés et les seules diagraphies différées.

À noter que quel que soit le programme retenu, avec ou sans échantillons (carotte, mini-carotte ou déblais), l'association de diagraphies différées de Résonance Magnétique et de porosité Neutron restent la plus recommandée.

Pour finir, nous rappellerons ici que les outils et méthodes de mesures sur forage évalués dans ce projet sont ceux et celles déjà éprouvés dans le domaine du forage profond et disponibles sur le marché. Or d'autres méthodes de mesures de géophysique sol telles que la tomographie sismique 3D (PVS-3D ou PVO-3D), l'électromagnétique (EM) ou encore le radar de puits, plutôt employées dans le cadre de projets de Recherche et Développement, mériteraient d'être analysées dans une prochaine étude.

5. Bibliographie

Ayan et al. (2001) - Characterizing Permeability with Formation Testers. *Oilfield Review*, Volume 13, Issue 3.

Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D., Darricau G., Lemale J., (2012a) - Étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Ile-de-France. Rapport BRGM/RP-60615-FR, 165 p., 56 fig., 16 tabl., 4 ann.

Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D., Darricau G., Lemale J., (2012b) - Synthèse de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Ile-de-France. Rapport BRGM/RP-61325-FR, 165 p., 9 fig., 4 tabl.

Blanz et al. (2010) - Nuclear Magnetic Resonance Logging While Drilling (NMR-LWD): from an Experiment to a Day-to-Day Service, diffusion-fundamentals.org

Bouniol, B., Maget, Ph. (1983) - Ressources géothermiques au Lusitanien dans le bassin parisien. *BRGM/83-SGN-045 GTH*.

Bouniol B. (1985) - Étude d'un réservoir géothermique carbonaté : Le Lusitanien de la région parisienne. Thèse de 3^{ième} cycle. Sciences Naturelles « mention Géologie ». Université Pierre et Marie Curie-Paris 6^{ième}. Institut mixte de recherches géothermiques du Service géologique national. *BRGM/85-SNG-053-IRG*. 144 p.

Caritg S., Bourguine B., Foissard D, Lopez S., avec la collaboration de Allanic C. et Zammit C. (2014) - Projet LUSITANIEN - Évaluation du potentiel géothermique du Lusitanien du bassin de Paris pour la production de chaleur : mise en adéquation entre ressource et besoins. Rapport final. BRGM/RP-63244-FR, 147 p., 43 fig., 13 tabl., 8 ann.

Dlibac et al. (2013) - Use of NMR Logging to obtain estimates of hydraulic conductivity in the High Plains aquifer, Nebraska, USA. *Water resources research*, vol. 49, 1871-1886, doi:10.1002/wrcr 20151.

Guéguen et al. (1996) - Scales of rock permeability. *Surveys in Geophysics*, Vol. 17, pp.245-263.

Hamm V. (2014) - Expertise du développement de l'exploitation de l'aquifère du Dogger dans le secteur ouest du Val-de-Marne. *Rapport final BRGM/RP-63792-FR*. 100 p., 31 fig., 4 tabl., 5 ann., 1CD.

Heaton et al. (2012) - New Generation Magnetic Resonance While Drilling, SPE 160022-pp

Housse et Maget (1976) - Potentiel géothermique du bassin parisien. Action concertée entre le BRGM et le groupe Elf-Aquitaine, *Editions BRGM*. 125 p., 29 planches.

Johnston testers INC. (1961) - Practical Drill Stem Testing Manual.

Mégnien C. et al. (1980) - Synthèse géologique du bassin de Paris –Stratigraphie et paléontologie. Mémoire BRGM n° 101.

Schlumberger (1989) - Log Interpretation Principles / Applications, SMP-7017.

Schlumberger (2012) - Wireline Log Quality Control Reference Manual, 11-FE-0131.

Schlumberger (2015a) - Wireline Services Catalog, 14-FE-0074.

Schlumberger (2015b) - Drilling and measurement technologies. Quick reference guide.

Serra O. (1984) - Fundamentals of well-log Interpretation - Vol 1 the acquisition of logging data, edition Elsevier, Pau.

Tarek A. (2006) - Reservoir Engineering Handbook, *Editions Elsevier*.

Weatherford (2013) - GuideWave Azimuthal Resistivity Tool, 8637.01.

Weatherford (2014a) - Wireline Services catalog. **Weatherford (2009)** - MFR Multi-Frequency .Resistivity High-Temperature LWD Sensor, 2974.04.

Weatherford (2014b) - Shockwave, LWD sonic Data in Real Time, 11392.00.

Weatherford (2014c) - Sinewave Microimager, 11060.01.

Weatherford (2014d) - CrossWave Azimuthal Sonic Tool, 11195.00.



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