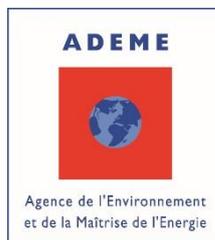
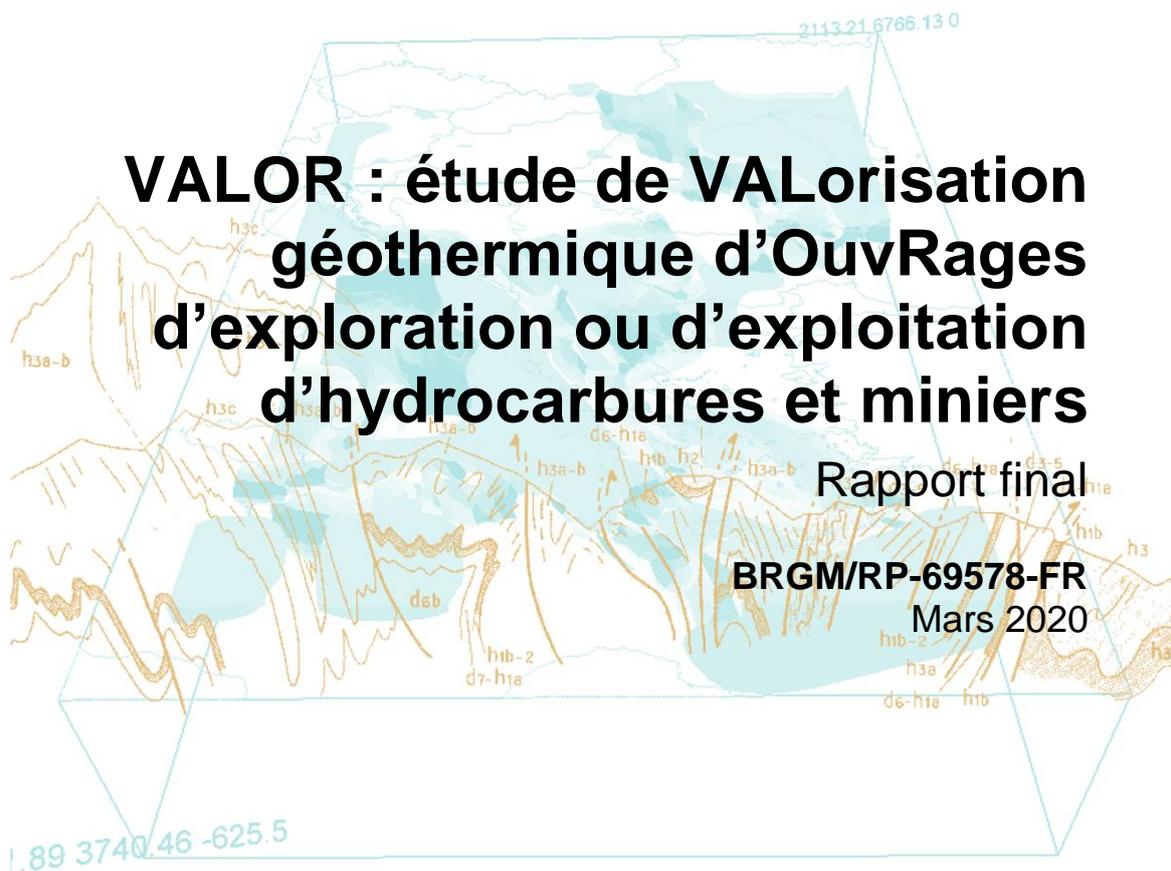


Document public





# VALOR : étude de VALorisation géothermique d'OuvRages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures et miniers

Rapport final

**BRGM/RP- 69578-FR**

Mars 2020

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

**Hamm V., Bugarel F., Maurel C., Maragna C. (BRGM), Audouin O. (CFG)**

**Vérificateur :**

Nom : Sanjuan B.

Fonction : Responsable d'unité

Date : 02/07/2020

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Lahondère D.

Fonction Directeur adjoint DGR

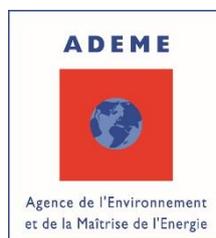
Date : 03/07/2020

Signature :



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

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



**Mots-clés** : Forages d'hydrocarbures, Reconversion, Géothermie, Cadre réglementaire, Titre minier, Boucle ouverte, Boucle fermée, Émergences minières, Puits de mine, Préfaisabilité technico-économique.

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

**Hamm V., Bugarel F., Maurel C., Maragna C. (BRGM), Audouin O. (CFG)** (2020) – VALOR : étude de VALorisation géothermique d'OuvRages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures et miniers. Rapport final BRGM/RP-69578-FR, 69 p., 24 fig., 14 tabl.

## Synthèse

Ce projet financé dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM 2019 n° 1805C0054 fait suite aux projets PETROVAL (BRGM/RP-68593-FR, (Maurel *et al.*, 2019)) et VALGEOMIN (BRGM/RP-67529-FR, (Hamm *et al.*, 2018)) des conventions nationales précédentes 2018 et 2017.

Ce rapport présente, dans une première partie :

- l'étude du cadre réglementaire de la reconversion de forages pétroliers, avec une référence aux textes/décrets relatifs à l'exploitation des hydrocarbures ou de la géothermie, les dispositions du Code minier relatives à l'arrêt définitif des travaux miniers (DADT), et notamment, à la fermeture des forages et les conditions de reconversion des forages applicables selon leur statut juridique ;
- l'étude de deux cas potentiels de reconversion en boucle ouverte (forages de NSL-1/NSL-2 de Nesles et LCX-2/LCX-4 de La Croix Blanche) et un cas en boucle fermée (forage LPS-4 de Les Pins), après échanges avec les opérateurs actuels.

Dans une seconde partie, le rapport présente une synthèse des résultats marquants du potentiel de valorisation des ouvrages miniers (émergences minières, puits de mine) suivis par BRGM/DPSM, dans le cadre de son activité de surveillance des sites miniers. Cette partie a donné lieu à un rapport spécifique (BRGM/RP-69735-FR (Bugarel, 2020)).

L'analyse menée sur la reconversion en boucle ouverte des forages NSL-1, NSL-2 (forages « ouverts ») et LCX-2, LCX-4 (forages « bouchés ») indique que la reconversion est possible et intéressante, si l'ouvrage présente un tubage avec un diamètre minimal en 7".

Pour Nesles, les deux forages ont un tubage 7" jusqu'au réservoir, avec la particularité toutefois pour le forage NSL-2 d'avoir un liner cimenté en 4"1/2, au droit des formations du Trias. Ainsi, ce forage serait plutôt à reconvertir en injecteur car il ne laisse pas la possibilité de mettre en place des crépines adaptées au droit des formations clastiques. Par contre, en cas de remontée à des formations sus-jacentes comme le Dogger, les deux cas peuvent être envisagés (producteur ou injecteur).

Le forage LCX-2 a été écarté rapidement pour une reconversion car ce dernier a été foré en 8"1/2, puis 6", avec un tubage en 7", sur la partie supérieure (jusqu'à 220 m) et laissé en *open-hole*, avant d'être bouché. Du fait du faible diamètre et qu'il n'a pas été tubé, une reprise semble risquée et peu intéressante. Par contre, le forage LCX-4 présente un tubage 7" sur toute sa hauteur et peut être un candidat potentiel pour une reconversion, avec la nécessité de reforer les différents bouchons mis en place lors de la fermeture du puits. La réalisation d'un nouveau forage ou utilisation d'un autre forage à proximité serait, par contre, nécessaire comme second puits pour produire ou réinjecter le fluide.

Les coûts de reconversion ont été estimés sur la base des différents travaux à réaliser pour chacun des forages. Les coûts ne comprennent pas les coûts de Maitrise d'œuvre (phase d'étude, de consultation des entreprises, de supervision ...) et d'assurance TRC.

Les résultats de cette évaluation préliminaire indiquent que les coûts de reconversion d'un forage varient **entre 400 et 1 000 k€, selon les travaux à réaliser**. Ces coûts sont évidemment à mettre en exergue avec le coût de la réalisation d'un forage neuf au Dogger ou au Trias, dont l'ordre de grandeur varie **entre 4 000 et 7 000 k€, soit un facteur entre 7 et 10**. Néanmoins, il est important

de noter également que l'architecture imposée des puits (au mieux tubage 7", voire en 5", s'il y avait besoin de réaliser un rechemisage, suivant l'état effectif des tubages) ne permettra pas d'exploiter à des débits au-delà de 100 m<sup>3</sup>/h (quelques dizaines de m<sup>3</sup>/h), indépendamment des caractéristiques de la formation ciblée. Cela reste toutefois intéressant avec des puissances extractibles, suivant la température de la ressource exploitée entre 0,5 et 5 MW (entre 5 et 15 MW pour un nouveau doublet présentant des diamètres plus conséquents). Comparativement au coût du MW pour un nouveau doublet, entre 0,5 et 2,8 M€/MW, celui dans le cas de la reconversion de forages pétroliers serait entre 0,2 et 1,6 M€/MW. La reconversion est donc une solution qui reste intéressante avec toutefois les contraintes liées à l'architecture des forages (faible diamètre), leur localisation par rapport à un utilisateur potentiel et la nécessité d'avoir deux forages pas trop éloignés mais pas trop proches non plus (problème de la percée thermique) pour la production et la réinjection du fluide

L'analyse menée sur la reconversion en boucle fermée (échangeur coaxial) du forage LPS-4 suggère que les forages d'exploitation pétrolière de diamètre 7" sont également de bons candidats à la reconversion en boucle fermée. Le diamètre du forage (7") semble suffisant pour mettre en place un tubage central en composite tout en maintenant des pertes de charge acceptables. Le coût modéré du composite peut assurer une viabilité économique de l'installation, si le besoin est suffisamment élevé. La solution a été comparée à la réalisation d'un champ de sondes.

Dans le scénario le plus optimiste concernant l'état du puits (qui ne nécessite ni curage, ni recimentation), la reconversion est plus intéressante comparée à la construction d'un champ de sonde, **dès que la longueur équipée dépasse 1 700 m (soit un besoin annuel de 800 MWh/an environ), et est particulièrement justifiée pour une longueur jusqu'à 2 200 m, pour une fourniture de l'ordre de 1 200 à 1 300 MWh/an.** Ces conclusions reposent, néanmoins, sur des modèles numériques, qui mériteraient d'être validés expérimentalement.

L'analyse des émergences minières indique que, sur les **83 émergences minières répertoriées et faisant l'objet d'une surveillance par le BRGM/DPSM au titre de l'après-mine**, 28 émergences ont un débit moyen supérieur à 15 m<sup>3</sup>/h (soit 34 %), 9 ont un débit supérieur à 50 m<sup>3</sup>/h (11 %) et 7 présentent des débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/h (8 %). En terme de température, sur les 83 émergences minières répertoriées, 30 émergences ont une température moyenne supérieure à 15 °C (36 %) et 8 présentent une température supérieure à 20 °C (10 %). **Avec l'hypothèse d'un delta de température de 5 °C prélevé sur la ressource, les puissances extractibles peuvent être de quelques centaines de kW.**

Par ailleurs, les informations disponibles dans le cadre de la surveillance réalisée au titre de l'après-mine par le BRGM/DPSM, ont permis de localiser **536 puits (sur 546 recensés) sur le territoire national** et de relever un certain nombre d'éléments relatifs à la valorisation géothermique potentielle d'anciens sites miniers par l'intermédiaire de ces puits de mine. La très grande majorité de ces puits (84 %) est située dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais.

Ces puits miniers sont des points d'accès potentiels pour valoriser l'eau d'ennoyage des réservoirs miniers avec, toutefois, les contraintes liées à la production du gaz de houille (cas du Nord-Pas-de-Calais). Un certain nombre de pompages sont opérés pour maintenir le niveau d'eau à une côté donnée (bassin houiller de Lorraine, de Gardanne) et pourraient donner lieu à une valorisation thermique. Ces puits sont des accès potentiels à des volumes d'eau importants des réservoirs miniers (450 millions de m<sup>3</sup> évalués dans les 11 réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain) ou peuvent être utilisés directement (cas du puits Yvon Morandat de 10 mètres de diamètre, 800 mètres de hauteur ennoyée avec valorisation de ce volume d'eau de 60 000 m<sup>3</sup> pour une production évaluée à 1,3 GWh par saison).

Les perspectives du projet seraient maintenant l'identification de pilote(s) et de guichets pour démontrer et valider sur site la faisabilité techno-économique des différentes technologies envisageables pour la reconversion de forages pétroliers et/ou ouvrages miniers (exemple : reconversion du puits minier de Gardanne en cours).



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Étude de pré faisabilité relative à la reconversion de forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures pour de la géothermie.....</b>	<b>13</b>
2.1. PRÉAMBULE.....	13
2.2. ÉTUDE DU CADRE RÉGLEMENTAIRE .....	13
2.2.1. Textes de référence relatifs à l'exploitation des hydrocarbures ou de la géothermie.....	13
2.2.2. Dispositions du Code minier relatives à l'arrêt définitif des travaux miniers (DADT) .....	14
2.2.3. Condition de reconversion de forages d'hydrocarbures en forages géothermiques .....	18
2.3. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA RECONVERSION POUR QUELQUES CAS D'ÉTUDES.....	21
2.3.1. Sélection de cas d'étude.....	21
2.3.2. Phasage de la reconversion.....	28
2.3.3. Cas de reconversion de forages « actifs » : exemple de la reconversion en boucle ouverte des forages de Nesles NSL-1 et NSL-2 (77) .....	33
2.3.4. Cas de reconversion de forages « actifs » : exemple de la reconversion en boucle fermée du forage Les Pins LPS-4 (33).....	42
2.3.5. Cas de reconversion de forages bouchés : exemple de la reconversion en boucle ouverte des forages de la Croix-Blanche LCX-2 et LCX-4 (91).....	51
2.4. CONCLUSIONS.....	60
<b>3. Étude du potentiel de valorisation géothermique des ouvrages miniers.....</b>	<b>61</b>
3.1. PRÉAMBULE.....	61
3.2. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATION DES ÉMERGENCES MINIÈRES .....	61
3.2.1. Synthèse des émergences au niveau national.....	61
3.2.2. Estimation de la puissance extractible (MW) par émergence selon leurs caractéristiques débit/température .....	64
3.2.3. Le potentiel de valorisation géothermique des émergences minières selon une approche territoriale par bassins miniers.....	64
3.3. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATIONS DES PUIITS DE MINE .....	65
3.4. CONCLUSIONS.....	66
<b>4. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>67</b>
<b>5. Références bibliographiques .....</b>	<b>69</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Principe de fermeture définitive d'un forage.....	18
Figure 2 : Réglementation applicable à la géothermie.....	19
Figure 3 : Localisation des forages de Nesles et de la Croix-Blanche et isobathes (m NGF) du toit du Dogger calcaire d'après (Hamm et al., 2017). ....	23
Figure 4 : Localisation des forages de Nesles et de la Croix-Blanche et transmissivité krigée (Dm) du Dogger avec délimitation du sillon Marneux à l'Est d'après (Hamm et al., 2017). ....	24
Figure 5 : Localisation du secteur d'étude du projet Clastiq2 (Bouchot et al., 2012) et des 75 forages pétroliers utilisés pour la construction du modèle géologique et pétrophysique (les cercles bleus et violets correspondent respectivement aux forages pétroliers carottés possédant des mesures de porosité et perméabilité sur échantillons au Chaunoy et Donnemarie). ....	26
Figure 6 : Carte de favorabilité de la transmissivité des grès du Chaunoy, à partir des Lois phi-k selon le projet Clastiq2 (Bouchot et al., 2012). ....	27
Figure 7 : Carte de favorabilité de la transmissivité des grès du Donnemarie, à partir des Lois phi-k, selon le projet Clastiq2 (Bouchot et al., 2012). ....	28
Figure 8 : Diamètre 40 bras ouverts avant calibrage. ....	30
Figure 9 : Extrait de la coupe technique du forage NSL-2 (source : Geopetrol). ....	35
Figure 10 : Lois phi/K à partir des mesures sur carottes (source : Geopetrol).....	36
Figure 11 : Corrélation diagraphiques entre les forages NSL-1 et NSL-2 (source : Geopetrol). ....	37
Figure 12 : Logigramme des travaux de reconversion sur le puits NSL-1 ou NSL-2.....	41
Figure 13 : Vue en coupe du forage (tubage 7" en gris) avec le tube en composite 4"1/2 (en jaune). Schéma à l'échelle. ....	43
Figure 14 : Logigramme des travaux envisagés au puits LPS-4.....	45
Figure 15 : LPS-4 - Estimation de la l'évolution de la température avec l'abscisse en mètres déviés (position le long du forage).....	46
Figure 16 : Exemple de résultats de la simulation thermique dynamique, pour L = 1100 m et e = 300 kWh/ml/a. a : Évolution sur 10 ans de la puissance fournie par la PAC au bâtiment et de la consommation électrique totale (i.e. compresseur de la PAC et circulateur). b : Évolution des températures en entrée/sortie de l'échangeur géothermique. c : Bilan énergétique annuel (bleu : énergie « frigorifique » extraite du terrain, rouge : consommation du compresseur, jaune : consommation du circulateur). d : Coefficient de performance annuel (= SPF).....	47
Figure 17 : Comparaison entre modèle numérique et polynôme ajusté pour les 3 grandeurs d'intérêt. ...	48
Figure 18 : LPS-4 - Température minimale (à gauche), coefficient de performance SPF (au centre) et part de la consommation électrique du circulateur dans la consommation électrique totale (à droite) à la 10 <sup>ème</sup> année de fonctionnement. Les points représentent les évaluations du modèle numérique ; la ligne noire l'extraction linéaire pour une profondeur donnée. ....	48
Figure 19 : LPS-4 - Quantité de chaleur fournie par le PAC géothermique en fonction de la longueur équipée, pour la ligne noire et l'optimum technique représentés en Figure 18. ....	49
Figure 20 : LPS-4 - Pertinence économique de la reconversion en boucle fermée : estimation de l'investissement par quantité de chaleur livrée, pour différents scénarios de reprise de cimentation choisis de manière arbitraire (0,1 ou 2 cimentation/km de forage) et curage (avec ou sans), et comparaison avec un champ de sonde. Calcul économiques sur 25 années.....	51
Figure 21 : Coupe technique du puits LCX-2D, après bouchage (source : Vermilion). ....	54
Figure 22 : Coupe technique du puits LCX-4DG, après bouchage (source : Vermilion). ....	55

Figure 23 : Logigramme des travaux de reconversion sur le puits LCX-4. ....59  
 Figure 24 : Synthèse des émergences mininières. ....63

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des forages NSL-1 et NSL-2. ....33  
 Tableau 2 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de NSL-1. ....33  
 Tableau 3 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de NSL-2. ....34  
 Tableau 4 : Évaluation préliminaire des coûts des différentes phases de travaux avec fourchette basse et haute de la reconversion. ....40  
 Tableau 5 : Caractéristiques géométriques du forage LPS-4. ....42  
 Tableau 6 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LPS-4. ....42  
 Tableau 7 : Caractéristiques du tubage en fibre de verre. ....44  
 Tableau 8 : Paramètres retenus pour les simulations numériques. ....46  
 Tableau 9 : Coût de transformation de LPS-4 en échangeur géothermique. ....49  
 Tableau 10 : Paramètres retenus pour le dimensionnement du champ de sondes à l'aide de la méthode ASHRAE. ....50  
 Tableau 11 : Caractéristiques géométriques des forages LCX-2 et LCX-4. ....52  
 Tableau 12 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LCX-2. ....52  
 Tableau 13 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LCX-4. ....52  
 Tableau 14 : Coût de la reconversion de LCX-4 avec fourchette basse et haute. ....58



# 1. Introduction

Ce projet a été financé dans le cadre de la convention nationale ADEME-BRGM 2019 n° 1805C0054 et fait suite aux projets PETROVAL (BRGM/RP-68593-FR, (Maurel *et al.*, 2019)) et VALGEOMIN (BRGM/RP-67529-FR, (Hamm *et al.*, 2018)) des conventions nationales précédentes 2018 et 2017.

Le projet PETROVAL avait pour objectif de faire un état des lieux national des forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures potentiellement reconvertibles au regard des caractéristiques des ouvrages (profondeur atteinte (> 200 m), type d'ouvrage (exploration ou exploitation), ancienneté (< 50 ans)), des formations géologiques traversées et des technologies envisageables. L'analyse croisée des informations a permis de cibler une première sélection d'ouvrages par bassin qui pouvaient faire l'objet d'une étude de préfaisabilité technico-économique spécifique, et qui a été réalisée dans le cadre de ce travail. Le projet avait également présenté le retour d'expériences des reconversions réalisées aux niveaux national et international.

Le projet VALGEOMIN a permis de faire un retour d'expériences des reconversions d'anciens sites miniers en Europe et d'effectuer une synthèse du potentiel de valorisation géothermique de quatre sites français (mines de charbon de Lorraine, des Hauts-de-France, de Gardanne, mines de fer de Lorraine), dans le contexte actuel de l'après-mine, où persiste une activité de mise en sécurité et de surveillance menée par le BRGM/DPSM (Département Prévention et Sécurité Minière), depuis 2006, pour le compte de l'État. Dans ce cadre, les émergences minières sont un moyen de surveillance du fonctionnement hydraulique d'un réservoir minier, et à ce titre, la surveillance d'un nombre important d'émergences est réalisée régulièrement sur l'ensemble du territoire.

La reconversion d'ouvrages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures (forages) et miniers (émergences minières, puits de mine) pour la production de chaleur ou de froid est aujourd'hui un enjeu national majeur, qui s'inscrit pleinement dans le cadre de l'atteinte des objectifs de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) : celle-ci fixe, en effet, un objectif de 38 % de sources d'énergie renouvelable dans la consommation finale de chaleur à horizon 2030. Par ailleurs, le projet s'inscrit également dans le cadre de la loi n° 2017-1839 du 30 décembre 2017 mettant fin à la recherche ainsi qu'à l'exploitation des hydrocarbures et portant diverses dispositions relatives à l'énergie et à l'environnement. La loi prévoit qu'après l'article L. 132-12 du Code minier : « Art. L. 132-12-1 - Cinq ans avant la fin de sa concession et dans des conditions prévues par décret en Conseil d'État, l'exploitant remet à l'autorité administrative un dossier présentant le potentiel de reconversion de ses installations ou de leur site d'implantation pour d'autres usages du sous-sol, notamment la géothermie, ou pour d'autres activités économiques, en particulier l'implantation d'énergies renouvelables ».

Cette étude s'intéresse aux possibilités de reconversion des forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures pour la production de chaleur géothermale en présentant le cadre réglementaire en vigueur et en faisant une première évaluation technico-économique de la reconversion pour trois cas d'études, après échanges avec les opérateurs actuels. Cette étude reste au stade de la préfaisabilité, mais apporte des premières indications sur l'intérêt de la reconversion et les démarches juridiques nécessaires dans le contexte actuel de la fin d'exploitation des hydrocarbures programmée en France d'ici 2040.

L'étude s'intéresse également à la valorisation thermique des émergences minières et puits de mine qui font l'objet d'une surveillance par le BRGM/DPSM (Département Prévention et Sécurité

Minière) au titre de l'après-mine. Les principaux éléments sont synthétisés dans ce rapport et l'étude détaillée des différentes émergences ou puits de mine par région a donné lieu à un rapport spécifique (BRGM/RP-69735-FR (Bugarel, 2020)).

Le rapport est ainsi scindé en deux parties distinctes : la première concerne **une étude de pré faisabilité technico-économique relative à la reconversion de forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures pour de la géothermie, ainsi que l'étude du cadre réglementaire associé**, et la seconde concerne **un état des lieux et caractérisation des ouvrages miniers (émergences et puits de mine) suivis par le BRGM/DPSM** en vue d'une valorisation potentielle future.

## 2. Étude de pré faisabilité relative à la reconversion de forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures pour de la géothermie

### 2.1. PRÉAMBULE

Ce chapitre constitue la suite du projet PETROVAL de la convention ADEME-BRGM précédente. Il définit le cadre réglementaire de la reconversion d'ouvrages d'hydrocarbures en ouvrages géothermique et décrit trois exemples de reconversion potentielle en boucle ouverte ou boucle fermée. Les résultats de la première partie de projet ont fait l'objet d'un rapport spécifique (Maurel *et al.*, 2019) et ont permis de réaliser un état des lieux, à l'échelle de la France métropolitaine, des ouvrages potentiellement reconvertibles en boucle ouverte ou en boucle fermé, ainsi qu'un retour d'expérience des reconversions pour l'exploitation géothermale, en France et à l'étranger.

### 2.2. ÉTUDE DU CADRE RÉGLEMENTAIRE

Ce chapitre présente, dans un premier temps, le cadre réglementaire relatif à l'arrêt définitif des travaux d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures, afin de connaître les dispositions réglementaires relatives à la fermeture d'un forage et de comprendre, ainsi, la façon dont les ouvrages ont pu être fermés d'un point de vue technique. Dans un second temps, est présenté le cadre réglementaire associé à la reconversion de forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures (arrêtés ou en fin d'exploitation) pour de la géothermie.

Les possibilités de reconversion étudiées concernent essentiellement la géothermie basse énergie. Toutefois, une reconversion vers de la haute énergie est également envisageable. Le cadre juridique spécifique à ces deux situations est ainsi succinctement présenté.

#### 2.2.1. Textes de référence relatifs à l'exploitation des hydrocarbures ou de la géothermie

- Code minier, modifié notamment par la loi n° 2017-1839 du 30/12/2017 mettant fin à la recherche, ainsi qu'à l'exploitation des hydrocarbures en France, à l'horizon 2040, et portant diverses dispositions relatives à l'énergie et à l'environnement, et l'ordonnance n°2019-784 du 24 juillet 2019 modifiant les dispositions du code relatives à l'octroi et à la prolongation des titres d'exploration et d'exploitation des gîtes géothermiques.
- Textes d'application classés par ordre chronologique :
  - décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié<sup>1</sup> relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie ;
  - décret n° 2006-648 du 2 juin 2006 modifié relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain ;
  - décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains ;

---

<sup>1</sup> En particulier par le décret n° 2019-1518 du 30 décembre 2019

- décret n° 2016-1303 du 4 octobre 2016, modifié relatif aux travaux de recherches par forage et d'exploitation par puits de substances minières, et abrogeant l'annexe intitulée « Titre Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du décret n° 80-331 du 7 mai 1980 portant règlement général des industries extractives ;
  - arrêté du 14 octobre 2016 modifié relatif aux travaux de recherches par forage et d'exploitation par puits de substances minières ;
  - décret n° 2018-511 du 26 juin 2018 pris pour l'application de l'article L. 132-12-1 du Code minier aux concessions de mines d'hydrocarbures.
- Norme : NF X10-999 dédiée au « Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages ».

## **2.2.2. Dispositions du Code minier relatives à l'arrêt définitif des travaux miniers (DADT)**

### ***Principes généraux relatifs à l'arrêt des travaux miniers***

La procédure applicable aux travaux de fermeture d'ouvrages a évolué au cours du temps. Il est toujours nécessaire de se référer aux textes applicables à la date à laquelle l'arrêt des travaux a été réalisé.

Il est à noter également qu'il convient de distinguer la procédure dite « **d'arrêt des travaux miniers** » (relative aux travaux), de la procédure de « **renonciation du titre minier** », qui ne peut être mise en œuvre (sauf dans le cas où le titre minier a expiré et auquel cas elle n'a pas lieu d'être) qu'après la constatation de la bonne réalisation de l'arrêt des travaux miniers sur l'ensemble du périmètre de la concession.

**La procédure d'arrêt des travaux miniers actuellement en vigueur est définie par les articles L 163-1 à L163-12 du Code minier et les articles 43 à 51 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006.**

L'article L. 163-1 du Code minier précise que « *la procédure d'arrêt des travaux miniers s'applique à une installation particulière lorsqu'elle cesse d'être utilisée pour l'exploitation, à l'ensemble des installations et des travaux concernés lors de la fin d'une tranche de travaux, et en tout état de cause, à l'ensemble des installations et des travaux n'ayant pas fait l'objet de la procédure d'arrêt lors de la fin de l'exploitation* ».

La procédure d'arrêt des travaux miniers concerne tous les travaux miniers – à l'exclusion des travaux concernant les gîtes géothermiques de minime importance et des travaux d'exploitation des stockages souterrains relevant de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) – ainsi que tous les ouvrages et installations sous police des mines, et qui n'ont jamais été régulièrement déclarés, abandonnés ou arrêtés en totalité, au regard de la réglementation applicable, à la suite de l'arrêt des travaux d'exploration ou d'exploitation.

Les activités minières qui n'auraient pas été régulièrement autorisées, que ce soit en raison de l'absence de titre minier ou d'autorisation d'ouverture de travaux, sont également concernées par cette procédure. En outre, l'absence de titre minier ne fait pas obstacle à l'application de la procédure d'arrêt de travaux miniers (article L.163-10 du Code minier). Tout ouvrage ou installation sous police des mines est réputé avoir été abandonné ou arrêté en même temps que

son siège d'exploitation, ou lorsque celui-ci a été déclaré abandonné, avant l'entrée en vigueur du décret n° 80-330 du 7 mai 1980.

Les modalités de mise en œuvre de la procédure d'arrêt de travaux sont précisées dans la note technique du 6 juillet 2018 relative aux modalités d'application de la procédure d'arrêt définitif des travaux miniers, du transfert des installations hydrauliques et hydrauliques de sécurité, et de la prévention et de la surveillance des risques miniers résiduels.

L'arrêt définitif des travaux miniers fait l'objet d'une déclaration au préfet en application de l'article L.163-2 du code minier et de l'article 43 du décret n°2006-649 modifié. La déclaration est effectuée 6 mois, au moins, avant la fin des travaux miniers et de la cessation d'utilisation des installations.

La composition du dossier de déclaration d'arrêt définitif des travaux (DADT) est définie par l'article 43 du décret n° 2006-649 et par l'arrêté ministériel du 8 septembre 2004 relatif aux modalités techniques d'application de l'article 44 de l'ancien décret n° 95-696 du 9 mai 1995.

La composition du dossier doit répondre :

- aux exigences du décret n° 95-696, pour un dépôt avant le 6 octobre 2004 (date d'entrée en vigueur de l'arrêté ministériel du 8 septembre 2004) ;
- aux exigences de l'arrêté ministériel du 8 septembre 2004, pour un dépôt entre le 6 octobre 2004 et le 3 juin 2006 ;
- aux exigences du décret n° 2006-649 (article 43) et de l'arrêté ministériel du 8 septembre 2004, pour un dépôt, à compter du 4 juin 2006.

Le dossier de déclaration d'arrêt définitif des travaux doit comporter un mémoire exposant les mesures déjà prises et celles envisagées pour préserver les intérêts mentionnés à l'article L.161-1 du Code minier, qui comprennent les intérêts environnementaux.

Comme prévu à l'article L. 163-6 du Code minier, le préfet donne acte de la déclaration d'arrêt de travaux par arrêté préfectoral dit « arrêté préfectoral de premier donné acte » ou « AP1 ». Cet arrêté intègre également, en tant que de besoin, des mesures modifiant ou complétant celles prévues dans la déclaration. L'AP1 doit intervenir avant l'expiration du délai de six mois (installations particulières, arrêt partiel) ou de huit mois (tous les autres cas), sauf fixation d'un nouveau délai qui ne peut excéder le délai initial.

Le préfet pourra prescrire toutes les mesures utiles, notamment les travaux destinés à prévenir ou à mettre fin aux risques importants mettant en jeu les intérêts protégés jusqu'à l'intervention de l'arrêté prévu à l'article L. 163-9 reconnaissant la complète exécution des travaux (« arrêté préfectoral de second donné acte » ou « AP2 »).

L'exploitant fait procéder aux travaux de mise en sécurité (exécution des mesures déclarées et prescrites par l'AP1), puis produit un mémoire descriptif des mesures exécutées. Ce mémoire doit comporter la description précise des travaux réalisés et doit être accompagné de tous les justificatifs attestant de leur bonne exécution.

Sur la base de ce mémoire, la police des mines procède à une visite en présence de l'exploitant visant à constater, point par point, la réalisation des mesures de mise en sécurité. En conclusion de la visite, un procès-verbal de récolement est établi constatant la réalisation des travaux et les décrivant précisément. Sur la base de ce procès-verbal, le préfet prend un arrêté préfectoral

donnant acte de l'exécution de toutes les mesures de mise en sécurité, dit « arrêté préfectoral de second acte » ou « AP2 » qui met fin à la police des mines<sup>2</sup>.

### ***Dispositions réglementaires spécifiques à la fermeture des forages***

**Les dispositions mises en œuvre pour la fermeture définitive d'un sondage ou d'un puits ainsi que le schéma de fermeture doivent être définis dès le dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers prévu à l'article 6 du décret n° 2006-649 modifié.** À titre d'exemple, la Figure 1 présente les barrières d'isolation mises en place dans les cas spécifiques d'un puits d'exploitation et d'un puits d'exploration.

Pour tout type de travaux de recherche et d'exploitation par forage, l'exploitant devra transmettre au préfet un **programme de fermeture définitive** deux mois avant la date de début des travaux de fermeture. Il revient, alors, à ce dernier, de donner son accord sur le programme préalablement au lancement des travaux, conformément à l'article 41 du décret n° 2016-1303 modifié. Un silence du préfet pendant plus de 2 mois suivant le dépôt du programme vaut accord pour le démarrage des travaux.

Lors des travaux de fermeture définitive, toutes les dispositions doivent être prises pour notamment séparer, avec efficacité, dans le temps, par des barrières d'isolation, « *d'une part, les niveaux perméables à débits potentiels entre eux et, d'autre part, les séries de niveaux entre lesquels un débit incontrôlé est acceptable, des autres niveaux à isoler. Les mêmes dispositions sont prises pour isoler le ou les puits de la surface du sol ou du fond marin.* » (art. 41 du décret n° 2016-1303 modifié).

Le contenu du programme de fermeture est précisé à l'article 7 de l'arrêté ministériel du 14 octobre 2016 modifié.

Les articles 68 à 70 de l'arrêté du 14 octobre 2016 modifié apportent des précisions sur les travaux de fermeture des forages. Certains aspects, non exhaustifs, sont détaillés ci-après.

Un **contrôle de l'état des cimentations et des cuvelages**, ainsi qu'une **mesure de la pression dans les annulaires**, doivent être réalisés avant toutes opérations de fermeture définitive du forage.

**Les produits d'obturation**, qui seront ensuite utilisés pour la mise en place des barrières d'isolation, doivent, au préalable, faire l'objet d'échantillonnage et d'essais en laboratoire pour leur caractérisation dans les conditions du milieu d'utilisation. L'article 69 de l'arrêté du 14 octobre 2016 modifié dispose également que « *les produits destinés à réaliser les isolations constituent, une fois mis en place, une barrière solide efficace en vue de s'opposer à la circulation des divers fluides. Ces produits doivent, à l'exception de l'épaisseur des cuvelages et une fois la complétion enlevée, occuper la totalité de la section du puits initialement forée.* ».

Les produits d'isolation occupent, au minimum, une longueur de 50 m dans un cuvelage non affecté par des cavages, ou bien 100 m, dans les annulaires, les espaces existants entre le cuvelage et le terrain, les découverts cavés, les puits fortement déviés et les zones de pertes.

---

<sup>2</sup> Toutefois, par application du 2<sup>ème</sup> alinéa de l'article L.163-9 du code minier, le préfet pourra intervenir, entre l'AP2 et l'expiration du titre minier ou, en cas d'application des articles L.174-1 et suivants du code minier, jusqu'au transfert à l'Etat de la surveillance et de la prévention des risques miniers, lorsque des risques importants, nouveaux et susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens apparaissent.

L'isolation du puits, de la surface du sol ou du fond marin jusqu'au-dessus du niveau perméable le plus proche du sol ou du fond marin, est constituée, soit par une barrière pour laquelle les longueurs précisées précédemment sont doublées, soit par deux barrières respectant les règles dimensionnelles des barrières d'isolation des niveaux perméables entre eux. À défaut, la longueur de la barrière sommitale est au minimum de 100 mètres à compter de la surface du sol ou du fond marin.

Il est prévu que chaque barrière soit disposée dans le puits à une côte telle que la pression qui règne à sa base, en cas de mise en défaut de la barrière inférieure, soit inférieure à la **pression de fracturation** des terrains, à ce niveau. Il est à noter que, bien que cela ne soit pas imposé par la réglementation, les barrières solides consolidées sont, le plus souvent, constituées de ciment, mais aussi de résines ou de polymères (Lahaie, 2015). La pose des bouchons de ciment se fait, généralement, par circulation, au-dessus d'un bouchon mécanique ou visqueux placé à la côte donnée.

Une fois les barrières mises en place, des **essais et contrôles** doivent être réalisés avec, au minimum :

- la mesure de la position des surfaces supérieures des barrières ;
- un essai approprié permettant d'assurer la tenue mécanique et l'étanchéité en pression ;
- un contrôle par diagraphie pour les barrières dans les annulaires.

Les **essais en pression** sont réalisés par une mise en pression de la partie de la colonne, au-dessus du bouchon pour vérifier son étanchéité. Les **essais en poids** sont réalisés en descendant une tige et un poids de 10 à 15 tonnes sur le haut du bouchon pour vérifier la tenue de l'ouvrage. Les espaces entre les barrières sont comblés par des matériaux inertes (sable, gravier, inhibiteur de corrosion...). La tête de puits doit être enlevée et les cuvelages retirés sur au moins 2 m en dessous de la surface du sol, puis recouverts d'une plaque.

L'exploitant doit également démontrer que le site ne présente pas de risques pour les intérêts visés à l'article L 161-1 du Code minier. Une analyse de caractérisation des sols est réalisée. En cas de pollution avérée, un programme de réhabilitation des sols est établi et fait l'objet d'une information préalable au préfet.

L'exploitant fait procéder aux travaux de fermeture définitive du puits, et transmet au préfet le rapport de fermeture définitive du puits, au maximum, six mois après la fin des travaux, conformément à l'article 42 du décret n° 2016-1303 modifié. Ce rapport décrit de façon précise l'état du puits, lors de sa fermeture, ainsi que les mesures prévues pour préserver les intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du Code minier, conformément aux dispositions des articles L. 163-3 et suivants de ce code. Son contenu est précisé à l'article 12 de l'arrêté ministériel du 14 octobre 2016 modifié.

Il existe, par ailleurs, des dispositions spécifiques pour les forages qui ne sont plus utilisés depuis plus d'un an, mais dont la réutilisation est prévue à terme. Il s'agit de puits « mis en sommeil ». Les conditions sont fixées, notamment aux articles 36 et suivants du décret n° 2016-1303 modifié. Ainsi, cette mise en sommeil ne peut être mise en place que dans le cas où l'exploitant est en mesure de justifier que les cuvelages sont dans un état correct (pas de perforation du cuvelage par corrosion ou d'écrasement des crépines par exemple) et que les cimentations entre le cuvelage et le terrain permettent une isolation des niveaux perméables.

Les puits mis en sommeil doivent être contrôlés et les modalités de ce contrôle sont portés à la connaissance du préfet dans le cadre du programme de travaux annuel.

Chaque année, l'exploitant fournit au préfet une liste des puits mis en sommeil, le programme de maintenance réalisée sur ces puits, ainsi que les résultats de la surveillance associée. Il transmet également un argumentaire justifiant leur maintien dans cette situation ou, à défaut, leur échéance de fermeture définitive.

Les puits « mis en sommeil » restent soumis à la police des mines et sont sous la responsabilité exclusive des exploitants. Ainsi, dans le cadre de la reconversion, un puits « mis en sommeil » doit être considéré comme un puits en exploitation.

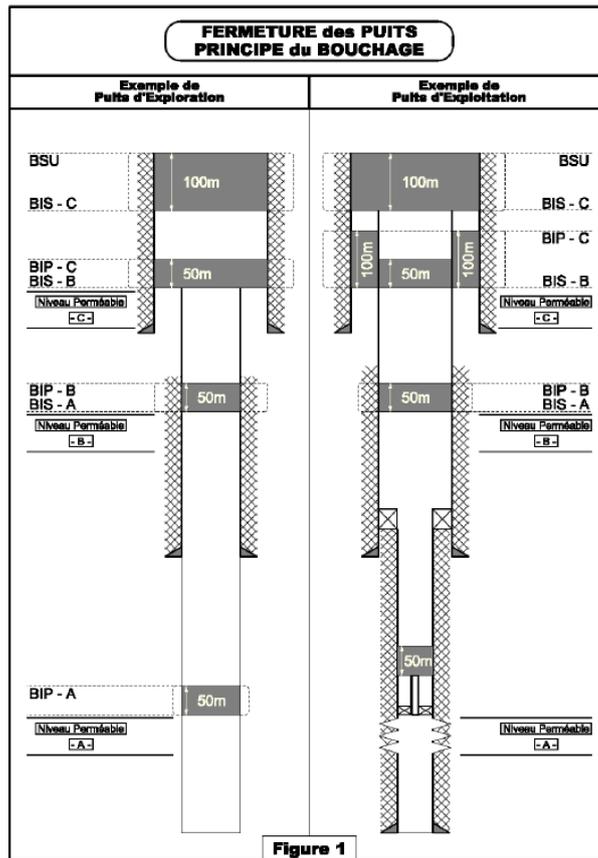


Figure 1 : Principe de fermeture définitive d'un forage.

### 2.2.3. Condition de reconversion de forages d'hydrocarbures en forages géothermiques

#### **Rappel des procédures préalables à la recherche et à l'exploitation des gîtes géothermiques**

##### **a. Instruction des titres miniers**

Le pétitionnaire choisit, librement, pour la phase d'exploration, le régime de recherches adapté (en fonction de la nature de son projet, de sa durée, du niveau d'exclusivité souhaité...) : soit l'autorisation de recherches, soit le permis exclusif de recherches (PER).

Les gîtes géothermiques sont exploités par un permis d'exploitation ou par une concession selon que la puissance primaire est, soit inférieure, soit supérieure ou égale à 20 MW. La puissance primaire correspond à la puissance thermique maximale, qui peut être prélevée du sous-sol sur l'ensemble du périmètre défini par un titre d'exploitation demandé.

Une autorisation de recherches ou un permis exclusif de recherches (indifféremment) peuvent donner lieu à une concession ou à un permis d'exploitation, dans le cadre du droit de suite, en fonction de la puissance primaire définie ci-dessus.

Ces 4 titres miniers de géothermie sont désormais régis uniquement par le décret n° 78-498 du 28 mars 1978 (modifié dernièrement par le décret n° 2019-1518 du 30 décembre 2019) : il n'y a plus de renvois vers le décret n° 2006-648.

**Le permis d'exploitation** est accordé pour une durée initiale maximale de 30 ans. Les prolongations sont possibles par périodes maximales de 15 ans (cas d'un certain nombre d'exploitations au Dogger en Île-de-France).

**La concession** est accordée pour une durée de 50 ans maximum, elle peut être prolongée par période de 25 ans, au maximum.

Les prolongations des permis d'exploitation ou des concessions sont soumises à concurrence, sauf dans le cas où le titulaire du titre démontre à l'autorité administrative que la dernière période de validité n'a pas permis de couvrir ses coûts de recherche et d'exploitation, en vue d'atteindre l'équilibre économique, par l'exploitation des gîtes géothermiques et des substances connexes.

Textes de référence	Code minier	
	décrets n°78-498 et n°2019-1518	
Recherche	Choix du pétitionnaire entre:	
	<b>Autorisation de recherches</b> délivrée par arrêté préfectoral	<b>Permis exclusif de recherches (PER)</b> délivré par arrêté ministériel
Durée-prolongation	<b>3 ans</b> , sans prolongation possible	<b>5 ans</b> , prolongation possible par 2 périodes de 5 ans au plus, ainsi que 1 prolongation exceptionnelle de 3 ans maximum
Concurrence	Directions régionales (DREAL, DEAL, DRIEE)	Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)
Consultation	Enquête publique	Participation du public conformément à l'article L.123-19-7 du code de l'environnement
	<p style="text-align: center;">Evaluation de la puissance primaire</p> <p style="text-align: center;"><b>&lt; 20 MW</b>                      <b>&gt;= 20 MW</b></p>	
Exploitation	<b>Permis d'exploitation</b> délivré par arrêté préfectoral	<b>Concession</b> délivrée par décret en Conseil d'Etat
Durée-prolongation	<b>30 ans</b> au maximum, prolongation par période de 15 ans au maximum	<b>50 ans</b> au maximum, prolongation par période de 25 ans au maximum
Concurrence	remise en concurrence pour <b>prolongations du permis d'exploitation ou de la concession</b>	
Consultation	Enquête publique	

Figure 2 : Réglementation applicable à la géothermie.

## ***b. Autorisation de travaux de recherches ou d'exploitation***

Après obtention du titre minier et avant le démarrage de tous travaux de recherche ou d'exploitation, le titulaire du titre minier doit déposer au préfet du département concerné **une demande d'ouverture des travaux miniers**, dont la procédure administrative est fonction de la gravité des dangers et inconvénients attendus. Si ces dangers et inconvénients sont qualifiés de faibles, la demande sera soumise au régime de déclaration. Dans le cas contraire, la demande devra faire l'objet d'une procédure d'autorisation.

En application de l'article 3 du décret n° 2006-649 modifié, **les travaux de recherches et d'exploitation des gîtes géothermiques, hors minime importance, sont soumis au régime de l'autorisation de travaux**. Il est à noter que, dans le cas de l'autorisation de recherche ou du permis d'exploitation, la demande d'autorisation des travaux peut être instruite par les services de l'État simultanément avec la demande de titre minier. Le contenu du dossier de demande d'autorisation est précisé à l'article 6 du décret n° 2006-649 modifié.

L'article L. 162-4 du Code minier prévoit que : « *l'autorisation d'ouverture de travaux de recherches ou d'exploitation est accordée par l'autorité administrative compétente, après la consultation des communes intéressées et l'accomplissement d'une enquête publique, d'une étude d'impact ainsi que, le cas échéant, d'une étude de dangers* ». Il est également spécifié que « *les modifications relatives aux travaux, aux installations ou aux méthodes de nature à entraîner un changement substantiel des données initiales de l'autorisation donnent lieu, dans des conditions fixées par décret en Conseil d'État, à une demande d'autorisation nouvelle soumise à l'accomplissement d'une enquête publique* ».

Dans le cadre de la procédure d'instruction, la demande d'autorisation fera également l'objet d'une évaluation environnementale du projet prévue par l'article L. 122-2 du Code de l'environnement, conformément aux dispositions de l'annexe du R. 122-2 du Code de l'environnement (rubriques 27 et 28).

## ***Cadre réglementaire de la reconversion***

Le cadre réglementaire pour la reconversion est abordé selon deux cas envisageables :

- les forages arrêtés régulièrement (arrêté préfectoral de second donné acte mettant fin à l'exercice de la police des mines), c'est-à-dire qui ont donné lieu à un arrêt définitif des travaux (DADT) ;
- les forages non arrêtés régulièrement, qui sont « ouverts » (et en activité), « en observation » (mis en sommeil) ou techniquement fermés. Dans ce dernier cas, il s'agit d'ouvrages qui ne sont plus techniquement exploités - certains d'entre eux ont même pu faire l'objet de travaux de fermeture - mais pour lesquels l'exploitant n'a pas déposé de déclaration d'arrêt définitif de travaux (DADT) auprès de l'administration. Ils restent donc, du point de vue administratif, des puits en exploitation et sont encore sous la responsabilité de l'exploitant.

### ***a. Cas des forages arrêtés régulièrement***

Dans ce cas un dossier de déclaration d'arrêt définitif des travaux (DADT) doit être disponible, qui permettra d'obtenir des informations sur l'architecture du puits, les couches géologiques traversées, les conditions d'exploitation et les travaux de fermeture réalisés (cf. § 2.1.2).

Le futur exploitant devra pour une exploitation géothermique de ce forage déposer une demande de titre d'exploitation pour la géothermie et une demande d'autorisation d'ouverture de travaux

de géothermie comme mentionné § 2.1.3. Ceci est également valable pour de la recherche ou l'explorateur devra déposer une demande de titre d'exploration pour la géothermie et une demande d'ouverture de travaux.

### ***b. Cas des forages non arrêtés régulièrement***

Deux cas peuvent se présenter :

- dans le cadre **d'une reconversion par le même exploitant**, en plus du titre d'hydrocarbures en vigueur, ce dernier devra faire **une demande d'un titre minier de géothermie et une demande d'autorisation d'ouverture de travaux de géothermie** (l'arrêt des travaux pour les installations nécessaire à la géothermie est ainsi reporté à la fin de l'exploitation géothermique<sup>3</sup>). Une co-production eau et pétrole est néanmoins envisageable. En effet, l'utilisation des eaux de gisement à des fins géothermiques, lors de l'exploitation d'hydrocarbures, peut être instruite comme un usage connexe à l'usage principal, et dans ce cas, un titre minier de géothermie ne serait pas nécessaire, après analyse au cas par cas. En tout état de cause, une demande d'autorisation d'ouverture de travaux de géothermie sera également nécessaire ;
- dans le cadre **d'une reconversion par un autre exploitant**, cela nécessite **un transfert de responsabilité**, selon le dernier alinéa de l'article L. 163-11, sur le transfert des installations hydrauliques, qui stipule notamment que *« les installations d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures liquides ou gazeux ainsi que les installations indispensables à la mine, au sens des articles L. 153-3 et L. 153-15, peuvent être converties ou cédées, en concertation et après avis des collectivités territoriales concernées, par l'explorateur ou l'exploitant à d'autres personnes publiques ou privées. Ce transfert s'accompagne du transfert des droits et obligations relatifs aux installations transférées mentionnés au titre V du présent livre. Il est approuvé par l'autorité administrative, sous réserve de l'exécution par le cédant de la procédure d'arrêt de travaux pour toutes les installations non nécessaires au nouvel usage projeté et sous réserve de l'octroi préalable d'un titre minier pour ce nouvel usage »*.

Ainsi, le repreneur reprend la responsabilité des installations cédées et doit **demandeur un titre minier pour la géothermie et déposer un dossier d'autorisation d'ouverture des travaux**. L'exploitant d'hydrocarbures doit, quant à lui, réaliser **un dossier de déclaration d'arrêt définitif des travaux de l'exploitation actuelle précisant notamment que l'arrêt des travaux ne concerne pas la partie transférée** et décrivant précisément les installations transférées ainsi que les conditions de transfert.

## **2.3. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA RECONVERSION POUR QUELQUES CAS D'ÉTUDES**

### **2.3.1. Sélection de cas d'étude**

Nous proposons dans la préfaisabilité technico-économique de réaliser différents cas d'étude de valorisation possibles. Notamment seront étudiés le cas de la valorisation en boucle ouverte (forages / doublet géothermique captant une formation aquifère) et le cas de la valorisation en boucle fermée (échangeur coaxial).

---

<sup>3</sup> Les installations n'étant plus nécessaires devront faire l'objet d'un arrêt de travaux. Dans ce cas, le dossier déposé devra préciser quelles sont les installations maintenues et celles qui seront arrêtés.

L'objectif, à partir de ces différents cas d'étude, est de recouvrir les différentes possibilités de reconversion et conditions nécessaires pour la reconversion. Pour les boucles ouvertes, la présence d'une formation avec des propriétés aquifères est nécessaire. Par ailleurs, la nécessité de réinjection est également à prendre en compte (article 17-2 de l'arrêté ministériel du 14 octobre 2016). Dans tous les cas, la préfaisabilité doit considérer l'état actuel du forage (cimentation, état des tubages, coupe technique), les éléments techniques à mettre en place en vue de la reconversion (diagnostic de l'état du forage, mise en place de bouchons pour obturer selon le cas une partie du forage, perforations de tubages/cimentation, réalisation de side-track, tests d'évaluation du réservoir, équipement à mettre en place). Le coût des travaux de reconversion sera ensuite comparé à la réalisation d'un nouveau forage pour les boucles ouvertes ou un champ de sondes pour les boucles fermées pour vérifier la pertinence économique de la reconversion.

Dans les cas étudiés de valorisation en boucle ouverte, deux types de forages sont considérés : des forages encore « actifs »<sup>4</sup>, en 2020, et des forages bouchés. Dans les forages « actifs », on distingue notamment les forages encore en exploitation et ceux « mis en sommeil », c'est-à-dire non opérés depuis plus d'un an et pouvant être remis en service. Pour les forages qui ont fait l'objet d'une fermeture définitive par mise en place, notamment, de barrières de sécurité (obturation par bouchons de ciment), la réouverture peut-être plus délicate à envisager.

Par ailleurs, ces dispositifs géothermiques n'ont un intérêt que s'il y a un besoin de chaleur ou des utilisateurs à proximité. Il peut s'agir de l'alimentation d'un réseau de chaleur ou l'utilisation pour un autre usage comme pour l'industrie, le chauffage de serres, ou tout autre activité économique et ludique.

Par la suite, et après contact avec les opérateurs pétroliers sur la base d'une pré-sélection de forages, **3 cas d'étude ont été retenus et sont analysés ci-après** :

- deux cas d'études en boucle ouverte (doublet géothermique), à partir de forages actifs (« ouverts » ou « en sommeil ») ou de forages fermés définitivement (fermeture avec des bouchons de ciment) :
  - o **forages « en sommeil » NSL-1 et forage en exploitation NSL-2 de Nesles (77)** (opérateur actuel Géopetrol), avec une valorisation possible des grès du Trias (Chaunoy, Donnemarie) ou des calcaires du Dogger (Bathonien) pour alimenter potentiellement un parc animalier (parc des Félines à proximité),
  - o **forages fermés définitivement LCX-2 et LCX-4 de La Croix Blanche (91)** (opérateur actuel Vermilion) avec une valorisation possible des grès du Chaunoy ou du Dogger pour alimenter potentiellement un réseau de chaleur (réseau de Bretigny-sur-Orge à moins de 4 km). Le Dogger est cependant *à priori* peu productif dans ce secteur (en bordure du sillon marneux) et la productivité du Trias incertaine ;
- un cas d'étude en boucle fermée (échangeur coaxial) à partir d'un forage actif en sommeil :
  - o **forage Les Pins LPS-4 à Arcachon (33)** (opérateur actuel Vermilion) ayant atteint les grès du Puberckien (3 925 m de profondeur).

Concernant les deux cas d'étude en boucle ouverte du Bassin parisien, ces derniers ont été positionnés par rapport aux connaissances actuelles dans le secteur de l'aquifère du Dogger et du grès du Trias (notamment grès du Chaunoy et Donnemarie).

---

<sup>4</sup> Forages opérés, suivis et maintenus par un exploitant

Les cartes des Figure 3 et Figure 4 localisent les forages de Nesles et de La Croix-Blanche en Île-de-France, avec l'indication de la profondeur du toit estimé du Bathonien et la transmissivité krigée (Hamm *et al.*, 2017), sur la base des forages géothermiques du secteur. On notera que, si le Dogger a de très bonnes caractéristiques dans le secteur de Nesles (profondeur, température, transmissivité), cela n'est pas le cas pour le secteur de la Croix-Blanche où on se situe en limite du sillon Marneux.

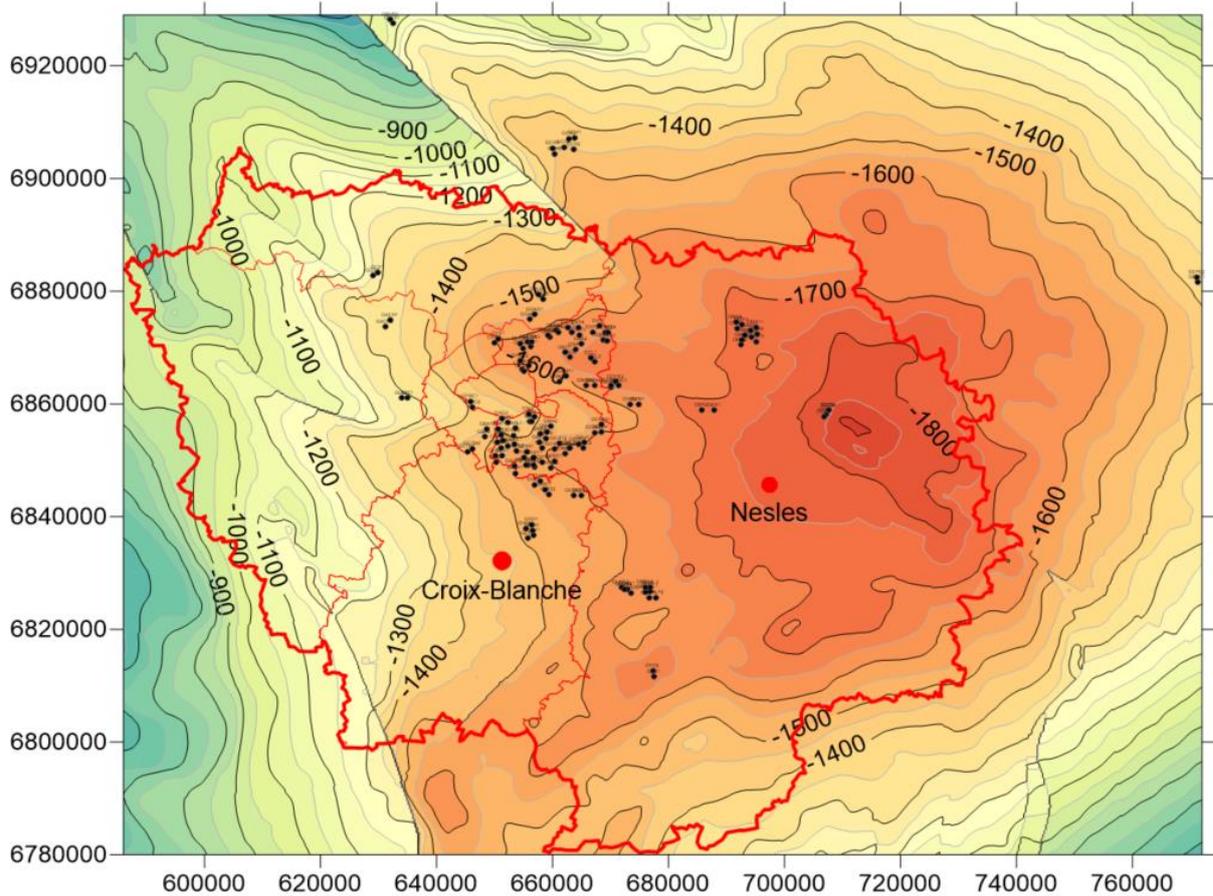


Figure 3 : Localisation des forages de Nesles et de la Croix-Blanche et isobathes (m NGF) du toit du Dogger calcaire d'après (Hamm *et al.*, 2017).

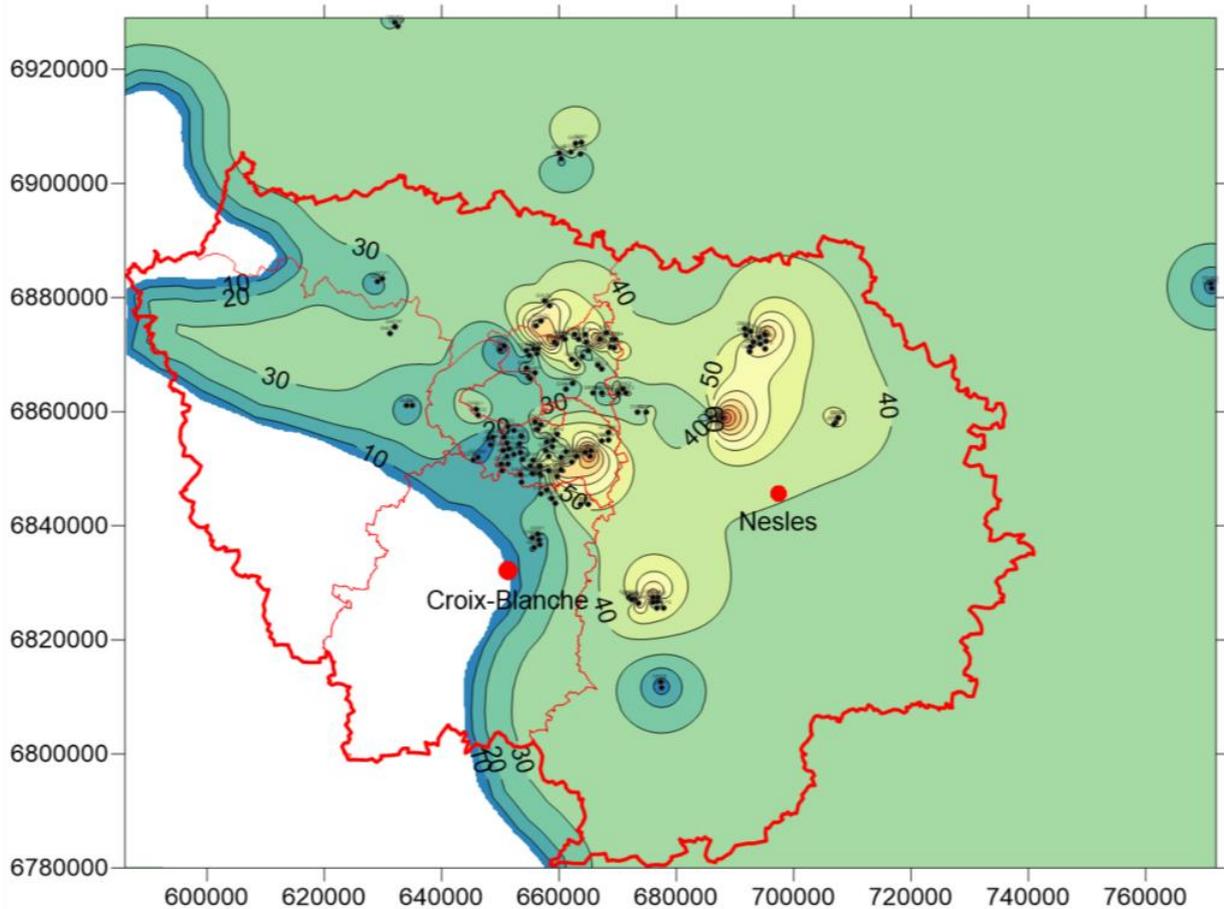


Figure 4 : Localisation des forages de Nesles et de la Croix-Blanche et transmissivité krigée (Dm) du Dogger avec délimitation du sillon Marneux à l'Est d'après (Hamm et al., 2017).

Les cartes des Figure 5, Figure 6 et Figure 7 indiquent respectivement le secteur d'étude et les forages pétroliers utilisés dans le projet Clastiq 2 (Bouchot *et al.*, 2012), ainsi que les zones à *a priori* les plus favorables en terme de transmissivité des grès du Chaunoy et du Donnemarie.

La méthodologie utilisée pour la réalisation du modèle géologique 3D du Trias du Bassin de Paris est basée sur l'application des concepts de la stratigraphie séquentielle, méthode développée initialement par les pétroliers. Ainsi, dans le Bassin de Paris, le découpage de la stratigraphie en séquence de dépôts fait apparaître 6 unités séquentielles pour les grès de Donnemarie et 4 à 8 unités pour les grès de Chaunoy (entre 10 et 40 m d'épaisseur par unité). Les corrélations des unités séquentielles sur 75 forages pétroliers sélectionnés sur une superficie de 120 x 140 km, à l'est de Paris (Figure 5), ont été reportées dans un modèle 3D PETREL prenant en compte les failles majeures du secteur d'étude. Le modèle géométrique est ensuite renseigné en environnements de dépôts qui varient latéralement. La deuxième étape a ensuite été « l'habillage » du modèle géométrique avec les propriétés pétro-physiques (porosité et perméabilité). Le paramètre de départ est la porosité matricielle qui est obtenue, soit par diagraphie, soit par mesures sur échantillons de carottes (plug). Des lois (phi-K) sont ensuite définies afin de corrélérer les mesures de perméabilité sur plug avec la porosité. Différentes lois sont définies par type de réservoir (Chaunoy, Donnemarie) et par type d'environnement de dépôts (cône alluvial distal, médian, proximal à médian, proximal). Dans une dernière étape du modèle, il s'agissait d'évaluer la transmissivité des différents réservoirs, à partir des données de perméabilité (lois phi-K) et du net-to-gross (pourcentage de hauteur utile de chaque séquence stratigraphique). Cette étape a

consisté, notamment, à calculer une perméabilité moyenne sur la hauteur de chaque séquence pour définir la valeur moyenne de perméabilité des sables utiles. La transmissivité est ensuite calculée par le produit des modèles de perméabilité et de hauteur utile pour chaque séquence.

**Ces modèles sont toutefois à prendre avec précaution**, notamment dans les zones peu contraintes par les forages (bordures du modèle), ainsi que sur les valeurs de transmissivités obtenues, basées sur les mesures de perméabilité sur carottes, qui ont tendance à sous-estimer la transmissivité réelle : pour cette raison, les cartes sont exprimées en termes de favorabilité et non en valeur de transmissivité intrinsèque (mD.m).

Pour les grès du Chaunoy (Figure 6), les zones les plus favorables se situeraient dans le périmètre de Meaux, Roissy-Charles de Gaulle et Villeneuve-Saint-Denis. Pour les grès de Donnemarie (Figure 7), les zones les plus favorables se situeraient dans le périmètre de Villeneuve-Saint-Denis, Coulommiers et Melun.

Les forages de Nesles sont, donc, *à priori* dans un secteur favorable tant pour le Dogger que potentiellement pour le Trias (Chaunoy et Donnemarie).

Par contre, les forages de la Croix-Blanche sont en bordure des calcaires du Bathonien et donc dans un secteur où le Dogger est moins favorable. Pour le Trias, on se situe en bordure du modèle Clastiq 2 ; ce dernier semble également peu favorable, mais comme indiqué ci-dessus, le modèle est moins bien contraint, et on ne peut pas écarter complètement, à ce stade, une productivité potentielle du Trias.

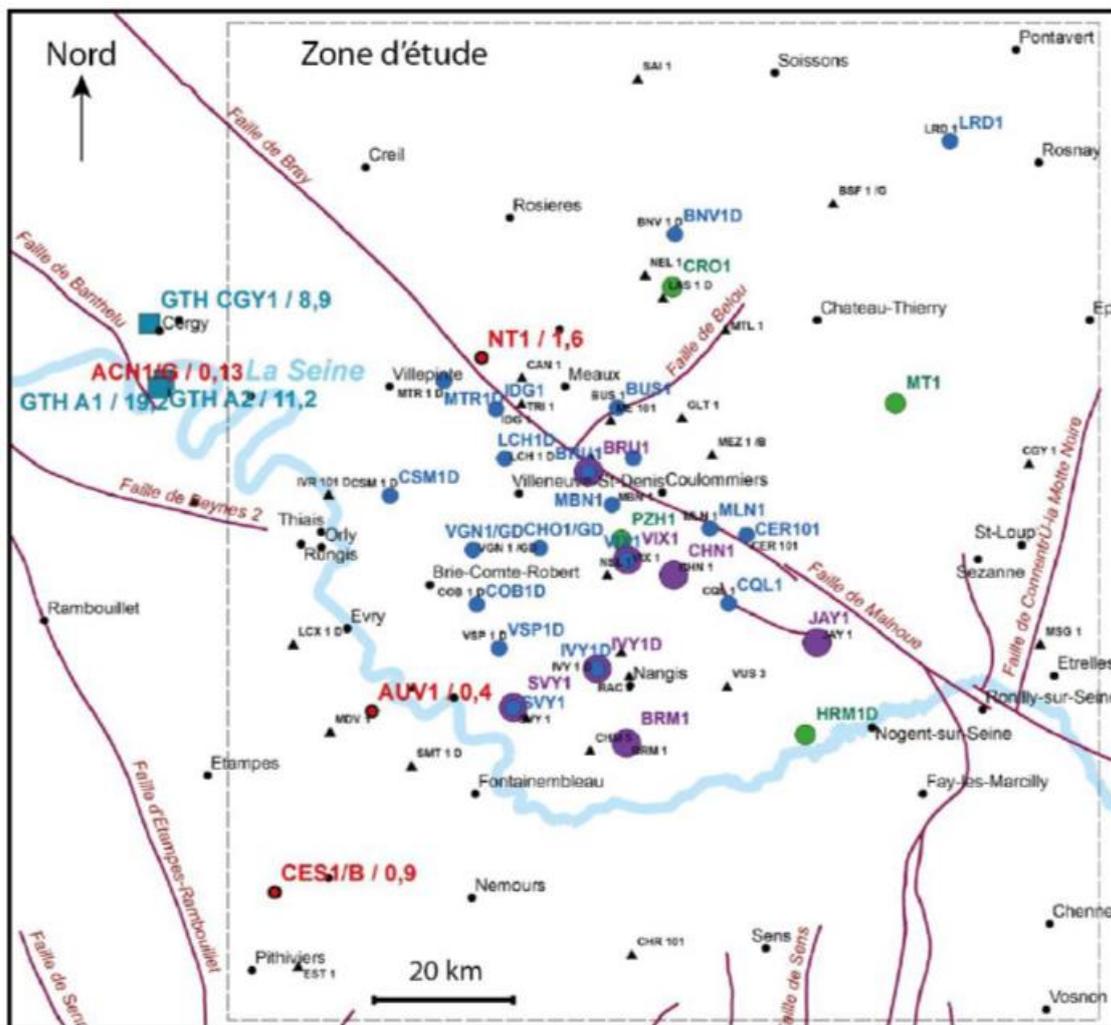


Figure 5 : Localisation du secteur d'étude du projet ClastiQ2 (Bouchot at al, 2012) et des 75 forages pétroliers utilisés pour la construction du modèle géologique et pétrophysique (les cercles bleus et violets correspondent respectivement aux forages pétroliers carottés possédant des mesures de porosité et perméabilité sur échantillons au Chaunoy et Donnemarie).

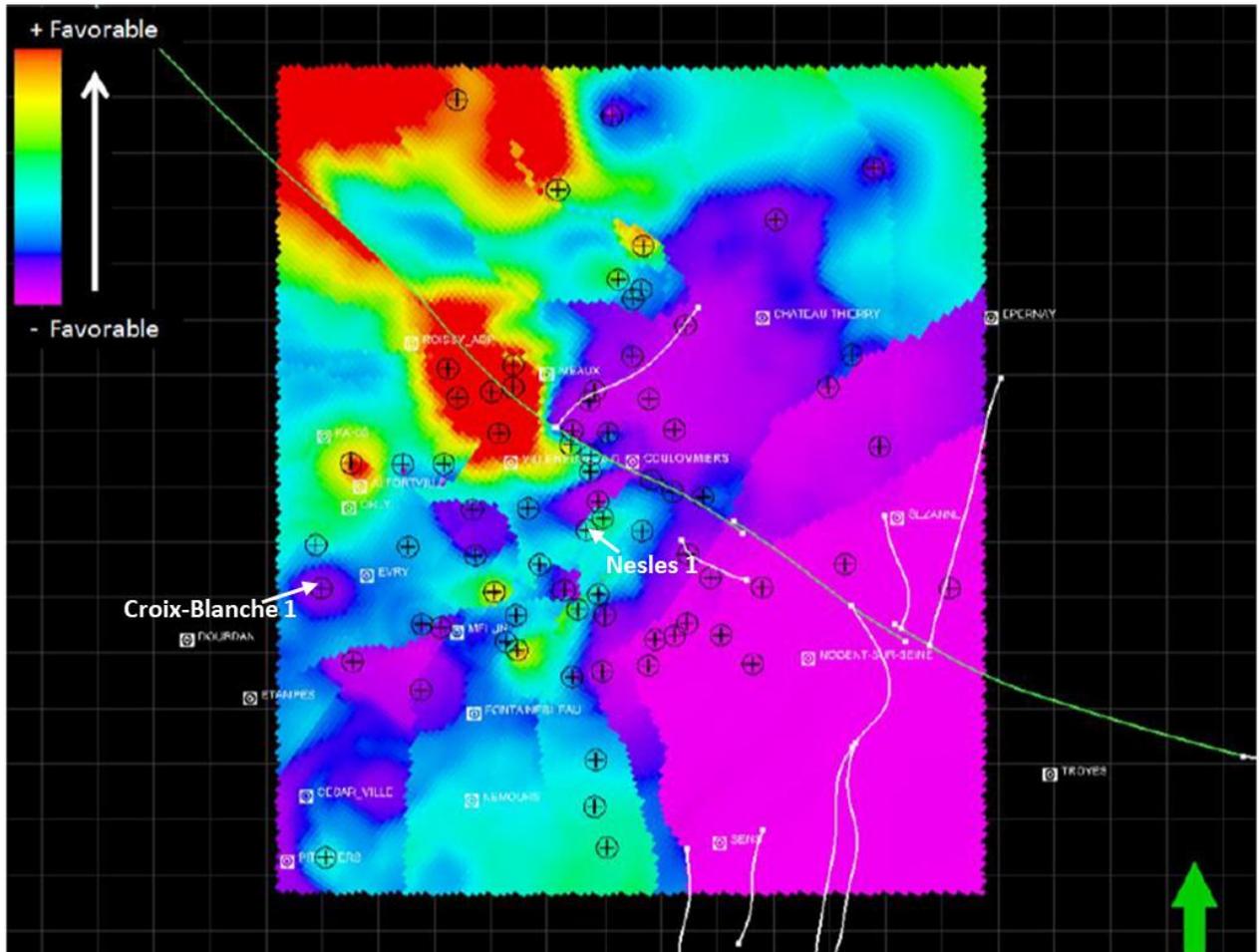


Figure 6 : Carte de favorabilité de la transmissivité des grès du Chaunoy, à partir des Lois phi-k selon le projet ClastiQ2 (Bouchot et al., 2012).

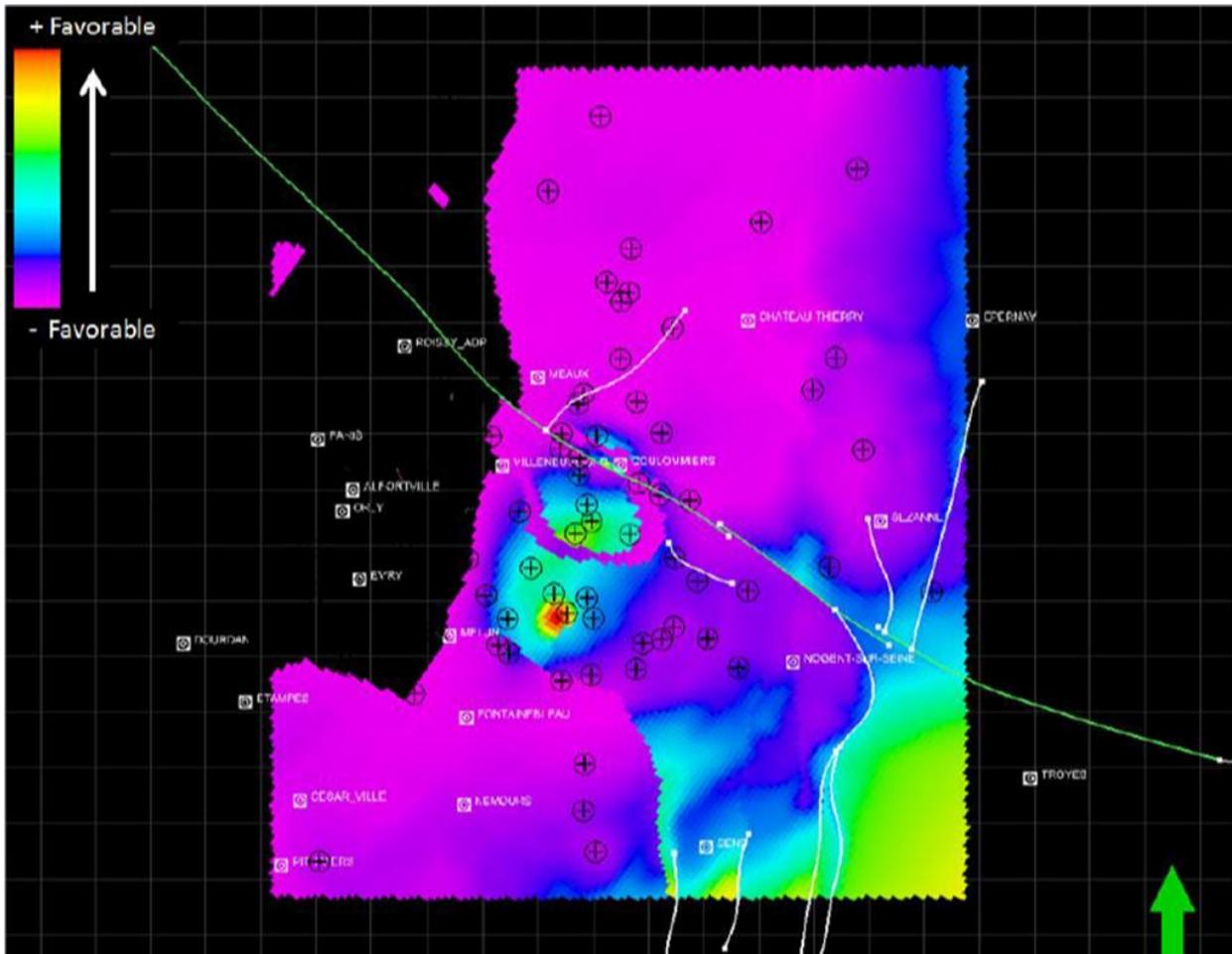


Figure 7. Carte de favorabilité de la transmissivité des grès du Donnemarie, à partir des Lois phi-k, selon le projet ClastiQ2 (Bouchot et al., 2012).

### 2.3.2. Phasage de la reconversion

Pour chaque cas d'étude, les travaux de reconversion des forages pétroliers sélectionnés seront réalisés en plusieurs étapes :

- 1) « Ouverture du puits »

Certains ouvrages peuvent avoir été « mis en sommeil » (ex. mise en place de vanne ou bridge plug pour les puits éruptifs, bouchon de fond), ou abandonnés avec fermeture définitive (bouchons de ciment).

Pour la réalisation des travaux de reconversion, une des premières étapes consiste à ré-ouvrir les ouvrages.

Dans le cas de la mise en place de bridge-plugs, l'ouverture du puits est réalisée par retrait des bridges plugs, soit par wireline, soit par l'appareil de servicing (type work-over). Dans le cas de bouchons de ciment (fermetures temporaires et définitives), le reforage est alors nécessaire avec la mise en place d'un appareil de servicing (type work-over).

## 2) « Diagnostic de l'état »

Cette phase permet de garantir l'étanchéité verticale et horizontale des tubages. Ce diagnostic est établi à partir des mesures de contrôle de cimentation (CBL/VDL) ou contrôles d'épaisseur (diamètres mécanique et acoustique).

### **Contrôle de cimentation**

La cimentation de l'extrados des tubages est le garant de la tenue mécanique et de l'isolation hydraulique par rapport aux formations géologiques aquifères traversées.

Les mesures de contrôle de cimentation doivent permettre de s'assurer que le ciment couvre une surface suffisante, est de bonne qualité pour garantir une isolation verticale et horizontale à l'extérieur du tubage.

Le principe du contrôle de cimentation par CBL/VDL est de mesurer l'atténuation d'une onde acoustique réfractée se propageant le long de la paroi du tubage. L'énergie de l'onde réfractée est mesurée par deux récepteurs séparés de 3' (91 cm) et 5' (1,5 m) de l'émetteur.

Le postulat de la technique est que l'énergie transmise dans le tubage est directement liée à l'adhérence entre le tubage et le ciment. En cas d'absence d'adhérence (forte rupture d'impédance), le signal réfracté reste confiné dans le tubage et se propage le long de celui-ci. L'atténuation est dans ce cas minimale et les amplitudes mesurées sur les récepteurs sont maximales. *A contrario*, lorsque le couplage entre le tubage et le ciment est optimal, une grande partie de l'énergie est transmise au ciment et l'atténuation est maximale (faible amplitude mesurée au niveau des récepteurs).

À partir des enregistrements d'amplitude en mV au niveau du récepteur 3', de l'épaisseur et du diamètre du tubage, l'indice d'adhérence (Bond Index) peut être établi (cf. fiche technique 072 : Contrôles de cimentation soniques et ultrasoniques, rapport BRGM/RP-65443-FR).

### **Diamètre Multibras mécanique**

Les diamètres mécaniques sont les outils de mesure les plus couramment utilisés pour établir un diagnostic de l'état des tubages. Ils sont munis d'une couronne de palpeurs mobiles dont les extrémités (appelées doigts) sont en contact avec la paroi interne du tubage. Le nombre de bras de mesure est variable (de 16 à 80 doigts) et augmente généralement avec la circonférence du tubage. La couverture d'auscultation (surface de contact des doigts de mesures par rapport à la surface totale du tubage) de ce type de mesure est relativement faible et dépend :

- du nombre de doigts ;
- de l'épaisseur et de l'écartement des bras ;
- de la rugosité de la paroi altérant le contact entre les bras de mesures et la paroi.



Figure 8 : Diamètreur 40 bras ouverts avant calibrage.

### **Diamètreur acoustique**

Le diamètreur acoustique est un outil qui permet de mesurer les rayons internes d'un tubage en utilisant des signaux acoustiques haute-fréquence. Un transducteur (en mode transmetteur) émet une impulsion haute-fréquence qui est réfléchié par la paroi du tubage vers généralement le même transducteur (en mode récepteur). Les valeurs de rayons sont établies à partir du temps de trajet de l'onde émise puis réfléchié et de la vitesse acoustique du fluide. Le transducteur est positionné sur une tête rotative afin d'établir une image à 360° de la paroi du tubage.

Par rapport aux diamètres mécaniques multibras, le diamètre acoustique présente l'avantage d'avoir une meilleure résolution radiale et de pouvoir être couplé avec des mesures d'épaisseur de tubage

### **Contrôle de l'épaisseur par mesure du temps de transit (ultrasonique)**

La mesure des épaisseurs par l'évaluation des temps de transit est une amélioration du diamètre acoustique. À partir du temps de transit provenant de la face interne du tubage (premier écho) et externe du tubage (second écho), et en connaissant la vitesse moyenne de propagation dans l'acier, l'épaisseur résiduelle du tubage peut être estimée.

### **Contrôle de l'épaisseur par diagraphie électromagnétique**

Les diagraphies électromagnétiques sont basées sur le principe de l'induction, à savoir l'interaction de champs magnétiques avec le matériel ausculté. Lorsqu'un matériau conducteur d'électricité (par exemple de l'acier) est soumis à un champ magnétique, des courants induits ou courants de Foucault sont générés. Ces courants sont directement liés entre autres aux variations d'épaisseur des tubages.

Les sondes de mesure sont constituées d'un ensemble de bobines où circule un courant alternatif. Le champ magnétique généré est perturbé en présence de matériaux conducteurs de l'électricité (tubage en acier), la perturbation étant causée par la création spontanée de courants secondaires (courants de Foucault) à l'origine de champ magnétique secondaire qui s'opposent au champ primaire.

Le champ secondaire dépend directement :

- des caractéristiques du tubage (conductivité électrique, perméabilité magnétique et épaisseur) ;
- des caractéristiques géométriques du dispositif de mesure ;
- des caractéristiques électriques du milieu environnant.

Le champ résultant (primaire plus secondaire) est évalué soit par la mesure de l'impédance de la bobine d'excitation, soit par la mesure de différents paramètres tels que l'amplitude et le déphasage aux bornes d'une seconde bobine.

Deux types de mesure peuvent être réalisés :

- les mesures relatives qui consistent à enregistrer uniquement les variations de déphasage et à la traduire en pourcentage de métal perdu. Elles s'utilisent soit par comparaison entre deux mesures espacées dans le temps, soit en traçant une ligne de base censée représenter le tubage sain ;
- les mesures absolues qui en utilisant plusieurs fréquences permettent d'accéder aux paramètres d'épaisseur et de diamètre interne, corrigés des défauts d'excentrement et de variations des propriétés électromagnétiques du tubage. L'intérêt de cette mesure est de pouvoir accéder, sans mesure préalable comparé aux mesures relatives, à l'épaisseur résiduelle d'acier.

### 3) « Tests de puits »

Cette étape des travaux de reconversion consiste à procéder aux tests de productivité ou d'injectivité des aquifères visés. Compte-tenu des tubages mis en place sur les puits pour les boucles ouvertes, la réalisation des essais de puits nécessite, au préalable, la réalisation de

nouvelles perforations au droit des horizons ciblés, afin de diminuer les pertes de charge dans le proche puits. Plusieurs séries de perforations pourront être réalisées.

En raison de la cimentation des tubages aux droits des aquifères, des opérations d'acidification seront nécessaires pour améliorer le proche puits. En fonction des résultats des essais de production ou d'injection, il pourra être procédé à de nouvelles perforations associées à des stimulations chimiques (acidification), voire fraisage du tubage.

#### 4) « Repli »

Pour les forages en boucle ouverte, si l'aquifère profond cible (Trias) n'était pas satisfaisant au niveau de la productivité ou de l'injectivité, la solution de repli vers l'aquifère sus-jacent (Dogger) serait mise en œuvre. La mise en place d'un bouchon de ciment au droit du réservoir du Trias serait réalisée afin d'assurer de l'absence de communication entre aquifère à l'intérieur du tubage.

Plusieurs séries de perforations seraient alors effectuées au droit des formations cible du Dogger. Ces perforations seraient associées à des stimulations chimiques (acidifications). En cas de productivité/injectivité du réservoir satisfaisante, mais de pertes de charges trop importantes dues aux perforations, il pourrait être procédé au fraisage du tubage au droit des horizons producteurs.

#### 5) « Reprise de l'intégrité des cimentations et des tubages »

Suite au diagnostic établi sur l'état des cimentations et des tubages, des solutions de remédiations pourront être mises en œuvre afin d'assurer l'isolation verticale entre les aquifères et horizontale au droit des aquifères.

En cas de percement ou de corrosion importante du tubage, la solution technique mise en œuvre dépendra de l'extension verticale des zones corrodées :

- pour des percements / zones de corrosion très localisées, un casing patch peut être mis en place. Il est utilisé pour réparer les colonnes de tubage endommagées sans avoir à sortir et remplacer l'intégralité de la colonne. Le casing patch est descendu à l'aide de tiges ou de tubings. Après déploiement du casing patch, la garniture est remontée et l'étanchéité est assurée par un packer seal ;
- en cas de corrosion généralisée, le rechemisage partiel ou total du puits devra être envisagé. Un tubage d'un diamètre inférieur (par exemple, un tubage 5" pour le rechemisage d'un tubage 7") sera descendu et cimenté.

#### 6) « Fermeture »

Si les explorations des aquifères du Trias et du Dogger pour la géothermie demeurent sans succès, alors les puits seront soit fermés définitivement et abandonnés soit resteront sous la responsabilité de l'exploitant (fermés provisoirement) si une reprise de l'activité pétrolière était envisagée.

En cas de fermeture définitive, l'abandon des puits sera réalisée en application du décret n° 2016-1303 du 4 octobre 2016 et de l'arrêté du 14 octobre 2016 relatif aux travaux de recherches par forage et d'exploitation par puits de substances minières.

Des barrières d'isolation seront mises en place et occuperont les longueurs minimales suivantes :

- 50 mètres dans un cuvelage ou dans un découvert non affecté par des cavages ;

- 100 mètres dans les annulaires, l'espace existant entre le cuvelage et le terrain, les découverts cavés, les puits fortement déviés et les zones à pertes.

### 2.3.3. Cas de reconversion de forages « actifs » : exemple de la reconversion en boucle ouverte des forages de Nesles NSL-1 et NSL-2 (77)

#### **Caractéristiques générales des forages et cible pétrolière**

Le forage NSL-1 est un forage d'exploration vertical réalisé en 1985 et ayant atteint les grès du Chaunoy du Trias supérieur du Bassin de Paris. Le forage NSL-2 est un forage de développement vertical, avec side-track (2 393,5 m), réalisé en 2013, et ayant ciblé, de même, les grès du Chaunoy. Les impacts entre les deux forages sont espacés de 537 m.

Les caractéristiques techniques des forages sont synthétisées ci-après (Tableau 1, Tableau 2 et Tableau 3).

Forages	NSL-1	NSL-2
<b>XL_93 tête de puits</b>	697872	698036.4
<b>YL_93 tête de puits</b>	6845050	6845568.6
<b>XL_93 fonds de puits</b>	697872	698029.1
<b>YL_93 fonds de puits</b>	6845050	6845563.8
<b>Profondeur forée</b>	2483 m	2556 m
<b>KOP</b>	-	-
<b>Inclinaison maximale</b>	-	10.3°
<b>Azimut</b>	-	239
<b>Déplacement horizontal</b>	0	8.73

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des forages NSL-1 et NSL-2.

Phases de forage	Profondeur forée (m)	Tubages	Côte sabot (m)	Hauteurs cimentées (m)
17"1/2	12-200	13"3/8	198	12-198
12"1/4	200-1255	9"5/8	1248	885-1248
8"1/2	1255-2483	7"	2443	1723-2056 2232-2483

Tableau 2 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de NSL-1.

Phases de forage	Profondeur forée (m)	Tubages	Côte sabot (m)	Hauteurs cimentées (m)
17"1/2	0-192	13"3/8	189	10-189
12"1/4	192-1257	9"5/8	1254 (DV à 860 m)	785-865 935-1254
8"1/2	1257-2360	7"	2358 (DV à 1403 m)	550-1445 2230-2358
6"1/8	2360-2556	L4"1/2	2554 (top à 2253,7 m)	2296-2522

Tableau 3 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de NSL-2.

Concernant les formations traversées présentant un intérêt pour la reconversion, au forage NSL-1, les calcaires du Bathonien ont été recoupés à 1887 m de profondeur (-1 773 m NGF), sur une épaisseur totale de 120 m. Les grès du Chaunoy ont été rencontrés à 2 391,5 m de profondeur (-2 278 m NGF), sur une épaisseur totale de 77 m.

Au forage NSL-2 (Figure 9), les calcaires du Bathonien ont été recoupés à 1887,7 m de profondeur (-1 771 m NGF), sur une épaisseur totale de 118 m. Les grès du Chaunoy ont été rencontrés à 2389,6 m de profondeur (-2273 m NGF), sur une épaisseur totale de 81,5 m.

L'analyse combinée des diagraphies et des mesures pétro-physiques sur des carottes réalisées dans les grès du Chaunoy, indiquent **la présence de la formation aquifère du Chaunoy (limite du contact huile-eau), à partir de 2 416 m de profondeur** (Figure 11). Ainsi, la base du Chaunoy, non exploitée par les pétroliers, présente des propriétés aquifères potentielles.

Les mesures réalisées sur les carottes par les opérateurs pétroliers sur la partie supérieure du Chaunoy à huile ont permis d'établir des lois  $\phi/K$  afin d'estimer la perméabilité des grès du Chaunoy en fonction de la porosité diagraphique (Figure 10). Au-delà d'une certaine porosité des grès (14 %), la perméabilité est plafonnée et proche de 500 mD.

Il est possible d'évaluer l'épaisseur utile des grès en considérant un *cut-off* sur la perméabilité. Ainsi, en prenant un *cut-off* à 100 mD, on aboutit à :

- NSL-1 : hauteur utile des grès de 10 m, porosité moyenne de 13,7 % et perméabilité moyenne de 304 mD ;
- NSL-2 : hauteur utile des grès de 23,5 m, porosité moyenne de 15,8 % et perméabilité moyenne de 358 mD.

Un calcul réalisé par Geopetrol et basé sur l'indice de productivité du puits conduirait à des débits potentiels compris entre 300 et 1 000 m<sup>3</sup>/j.

Ces valeurs sont, toutefois, à prendre avec précaution et seuls des essais de puits dans cette formation, proposés dans le cadre de la reconversion, pourront valider les débits réellement valorisables pour la production de chaleur géothermale et les caractéristiques du réservoir (transmissivité, productivité, température).

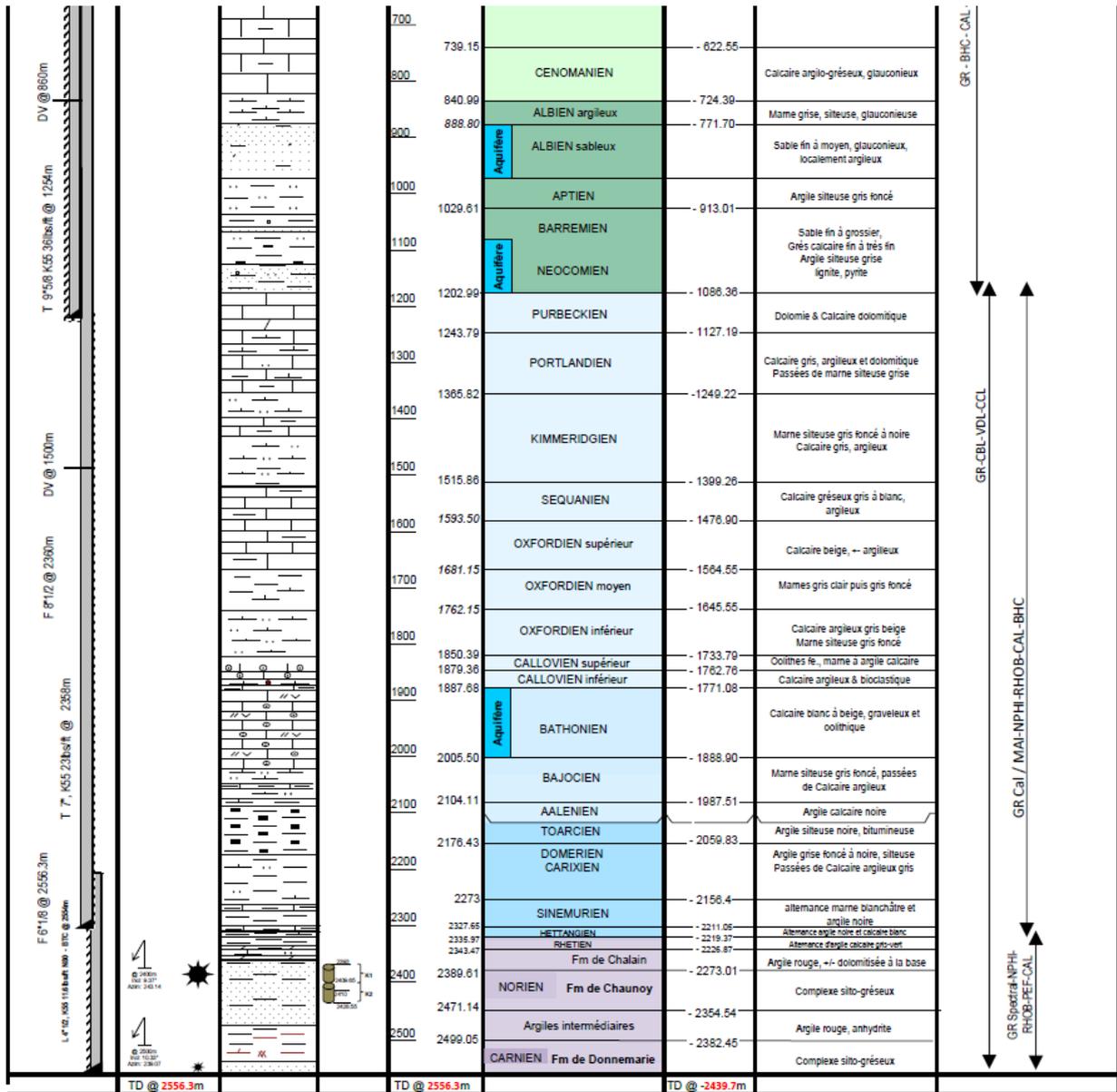


Figure 9 : Extrait de la coupe technique du forage NSL-2 (source : Geopetrol).

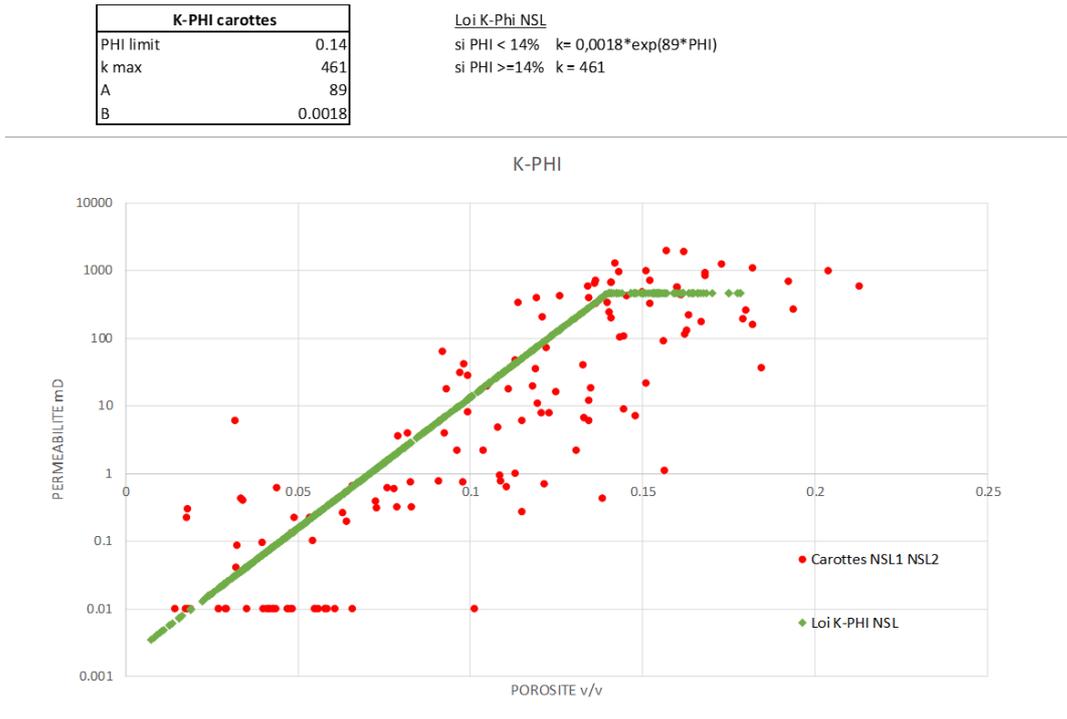


Figure 10 : Lois phi/K à partir des mesures sur carottes (source : Geopetrol).

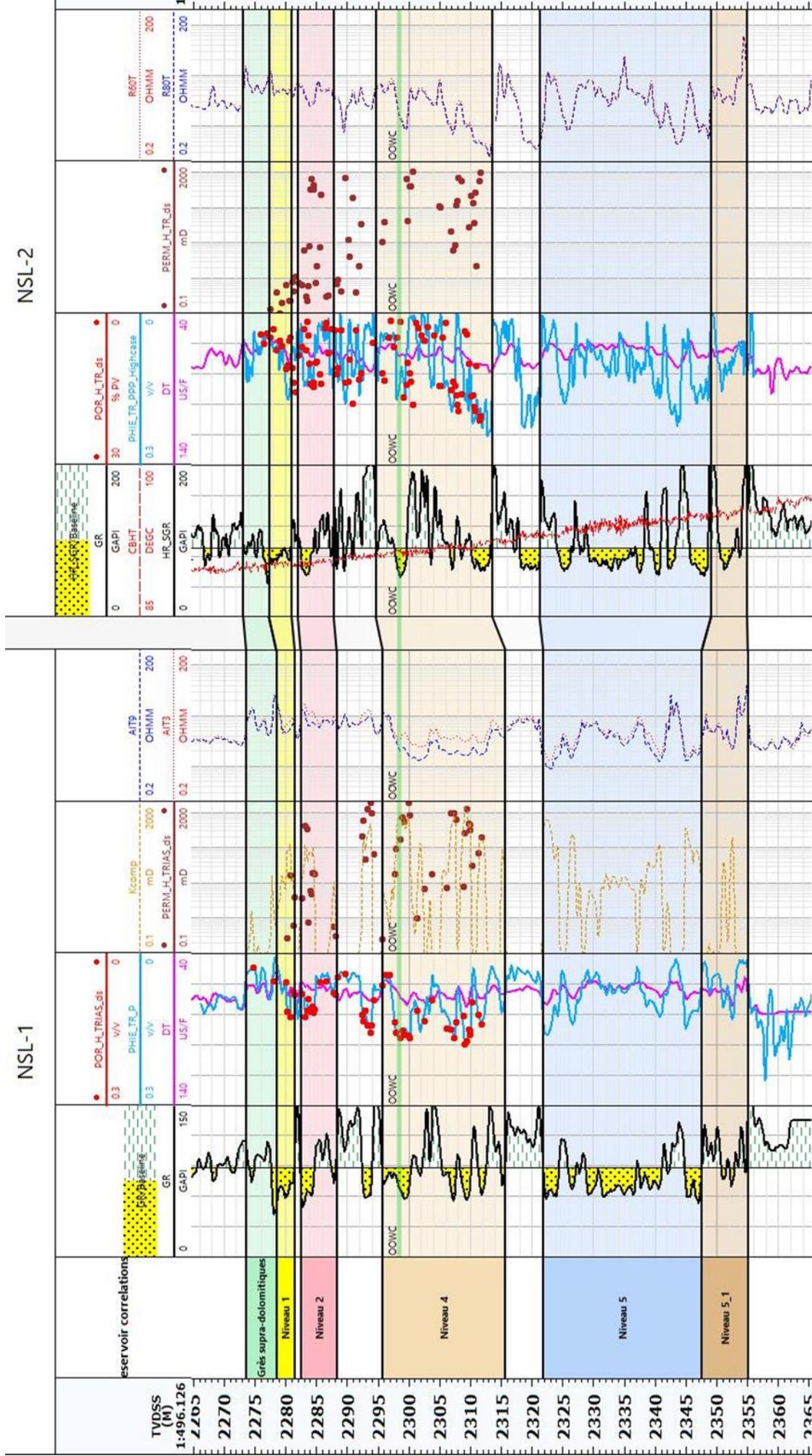


Figure 11 : Corrélation diagaphiques entre les forages NSL-1 et NSL-2 (source : Geopetrol).

## **Analyse technico-économique de la reconversion en boucle ouverte**

Le programme de reconversion en boucle ouverte des forages NSL-1 et NSL-2 est présenté sur le logigramme de la Figure 12.

À la différence du puits NSL-1, le forage NSL-2 est équipé d'un liner cimenté 4"1/2 au droit de l'aquifère du Trias. Le diamètre de ce liner ne permet pas la mise en place de crépines et d'un massif filtrant afin de limiter les venues de particules argileuses et sableuses ; de ce fait, il est proposé une reconversion du forage de NSL-2 comme puits injecteur, et NSL-1 comme producteur, dans le cas d'une exploitation du Trias. Dans le cas d'une exploitation du Dogger, l'un comme l'autre peuvent être producteur.

On notera, par ailleurs, que les deux ouvrages devront être testés au Trias l'un après l'autre (NSL1 puis NSL-2), afin de s'assurer que les deux ouvrages présentent des caractéristiques suffisantes du réservoir, avant de se lancer dans la reconversion/équipement et éventuellement travaux de remédiation des deux ouvrages.

Les différentes étapes préliminaires à la reconversion sont :

- Diagnostic des tubages

Cette première étape consiste à établir le diagnostic de l'état du tubage 7", à partir de la réalisation des mesures de diagraphies de type diamètreur et de contrôle des cimentations (CBL/VDL).

- Tests des formations du Trias

Après mise en place de la machine de work-over (capacité minimale de 80 tonnes), si un bridge-plug est positionné dans les tubages, il sera récupéré ou foré. Des nouvelles perforations au droit des formations ciblées seront réalisées. L'emplacement et le nombre de perforations seront déterminés, suite aux premiers résultats de mise en production du forage et de la coupe géologique.

Les tests des formations consisteront à réaliser des essais par palier et longue durée (avec enregistrement de la pression et de profil de flow-métrie, au niveau du réservoir) afin de caractériser la productivité/injectivité et les caractéristiques hydrothermiques du réservoir (transmissivité, température). En fonction des résultats, des nouvelles perforations et/ou des stimulations chimiques seront réalisées.

- Complétion (valable pour le forage NSL-1 seulement)

Si les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir sont satisfaisantes pour que le puits soit utilisé comme producteur, le puits sera équipé de crépines 4" sur l'épaisseur des grès du Chaunoy (intervalle 2 390 – 2 469 m).

- Repli au Dogger

Si malgré les développements et stimulations, l'aquifère du Trias ne satisfait pas le couple débit/température attendu pour le puits de production NSL-1 et/ou que l'injectivité n'est pas satisfaisante au puits NSL-2, le repli au dogger sera effectif.

Après la mise en place du bouchon de ciment au droit de l'aquifère du Trias, des perforations seront réalisées au droit du Dogger. Les tests de production et/ou d'injection (avec diagraphies

de production), couplés à des opérations d'acidification des carbonates, permettront de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir.

Trois cas sont envisageables :

- 1) si les caractéristiques du réservoir (transmissivité et/ou température) ne sont pas suffisantes, malgré les développements entrepris, le projet sera déclaré en échec et le puits abandonné par mise en place des bouchons de ciment ;
- 2) si les caractéristiques du réservoir sont satisfaisantes, mais toutefois que l'écoulement à travers les perforations entraînent des pertes de charges dans le proche puits trop importantes (valeur de skin (effet pariétal) élevée), le fraisage du tubage 7", au niveau du Dogger, sera effectué (la hauteur de fraisage sera ajustée en fonction des résultats du profil de débit-métrie verticale) ;
- 3) si les caractéristiques du réservoir et du puits sont satisfaisantes, aucune intervention ne sera réalisée sur le tubage, au niveau du réservoir.

- Remédiation des tubages

Afin de satisfaire les obligations réglementaires d'isolation entre aquifère et d'intégrité des tubages, le diagnostic précédemment établi permettra de définir les solutions de remédiation aux désordres identifiés :

- en cas de défaut de cimentation entre aquifère, il sera procédé à des perforations du tubage de part et d'autre de l'intervalle à cimenter. Si la circulation à l'extérieur du tubage n'est pas établie entre les deux séries de perforations, de nouvelles perforations seront réalisées. Lorsque la circulation sera établie, la cimentation de l'espace annulaire sera réalisée sous packer ;
- en cas de présence de dépôts importants sur la surface du tubage, un curage sera réalisé ;
- en cas de percements et/ou de corrosion importante du tubage, il sera procédé à un rechemisage partiel 5" du tubage ou à la mise en place de casing patch. La solution retenue dépendra de l'extension verticale de la partie corrodée.

Le puits NSL-1 devra être le puits producteur du doublet au Trias (en raison de l'équipement technique du puits NSL-2), ou soit le forage injecteur ou producteur du doublet au Dogger. Pour le forage producteur, une chambre de pompage en tubage 9"5/8 devra être réalisée par la coupe et le retrait du tubage 7". La profondeur de la coupe dépendra des résultats des essais de puits. Après retrait du tubage, un contrôle de cimentation CBL sera réalisé et des actions correctives (cimentation de l'annulaire) seront effectuées en cas de défaut majeur.

- Coûts prévisionnels

Les coûts prévisionnels des différentes phases des travaux envisagés pour le reconversion sont synthétisés dans le Tableau 4 . Les coûts ne comprennent pas les coûts de Maîtrise d'œuvre (phase d'étude, de consultation des entreprises, de supervision ...) et d'assurance TRC.

Les coûts minimaux pour la reconversion du forage NSL-1 incluent les diagraphies pour le diagnostic initial du forage (état des tubages 7"), l'amené-repli de la machine et aménagement, les tests d'exploration du Trias, et si la productivité est satisfaisante, la mise en place d'une chambre de pompage. Ce coût minimal est évalué à 545 k€ HT. Dans le cas où les tubages 7" ne seraient pas en bon état ou qu'il y ait un défaut d'étanchéité des cimentations entre aquifères, ce coût pourrait augmenter jusqu'à 830 k€ HT. Si le Trias n'était pas satisfaisant, alors serait

opéré le repli au Dogger, et dans ce cas, le coût de reconversion serait estimé entre 750 et 1 035 k€ HT.

Pour le forage NSL-2, ces coûts sont légèrement moindres car il n'y aurait pas de crépine à mettre en place, du fait du liner présent, et pas d'aménagement de chambre de pompage. Le coût de la reconversion au Trias serait entre 340 et 625 k€ HT, et au Dogger, entre 645 et 930 k€ HT.

**Ainsi, la reconversion des deux ouvrages NSL-1 et NSL-2 est évaluée entre la fourchette de 885 k€ et 1 965 k€ HT, suivant que serait exploité le Trias ou le Dogger.**

Phase	Item	Coût prévisionnel (k€ HT) NSL-1	Coût prévisionnel (k€ HT) NSL-2	Coût prévisionnel total (k€ HT)
Diagnostic initial	Diagraphies tubage 7" (diamètre et CBL/VDL) et interprétation	35	35	70
Amené-repli machine/ Aménagement plateforme	Amené repli appareil forage	120	120	240
	Aménagement plateforme	25	25	50
	<b>Sous-total</b>	<b>145</b>	<b>145</b>	<b>290</b>
Exploration/Exploitation du Trias	Perforations complémentaires au Trias	50	50	100
	Tests de Production et/ou d'injection + diagraphie PLT	80	50	130
	Acidification Trias (x2)	60	60	120
	Fourniture crépiné 4"	50	-	50
	Mise en place crépines	50	-	50
	<b>Sous-total exploration Trias</b>	<b>290</b>	<b>160</b>	<b>450</b>
Exploration/Exploitation du Dogger	Mise en place bouchon Trias	55	55	110
	Perforations au Dogger	50	50	100
	Acidification Dogger (x2)	50	50	100
	Tests de Production et/ou d'injection + diagraphie PLT	70	70	140
	Fraisage du tubage 7" au dogger	80	80	160
	<b>Sous-total exploration Dogger</b>	<b>305</b>	<b>305</b>	<b>610</b>
Curage (si dépôts importants)	Curage tubage 7"	80	80	160
Reprise Cimentation (si défaut de cimentation entre aquifères)	Perforations	40	40	80
	Cimentation tubage 7"			
	Contrôle cimentation 7"	15	15	30
Rechemisage (si percements ou corrosion importante)	Casing Patch	150	150	300
	Rechemisage tubage 5"	100 - 200	100 - 200	200-400
Chambre de pompage	Coupe et retrait tubage 7"	20 - 100	-	20-100
	Diagraphies 9"5/8 (diamètre et CBL/VDL) et interprétation	15	-	15
Abandon Dogger	Mise en place bouchon Dogger	55	55	110
	<b>Coût minimal reconversion Trias</b>	<b>545</b>	<b>340</b>	<b>885</b>
	<b>Coût maximal reconversion Trias</b>	<b>830</b>	<b>625</b>	<b>1455</b>
	<b>Coût minimal reconversion Dogger</b>	<b>750</b>	<b>645</b>	<b>1395</b>
	<b>Coût maximal reconversion Dogger</b>	<b>1035</b>	<b>930</b>	<b>1965</b>

Tableau 4 : Évaluation préliminaire des coûts des différentes phases de travaux avec fourchette basse et haute de la reconversion.

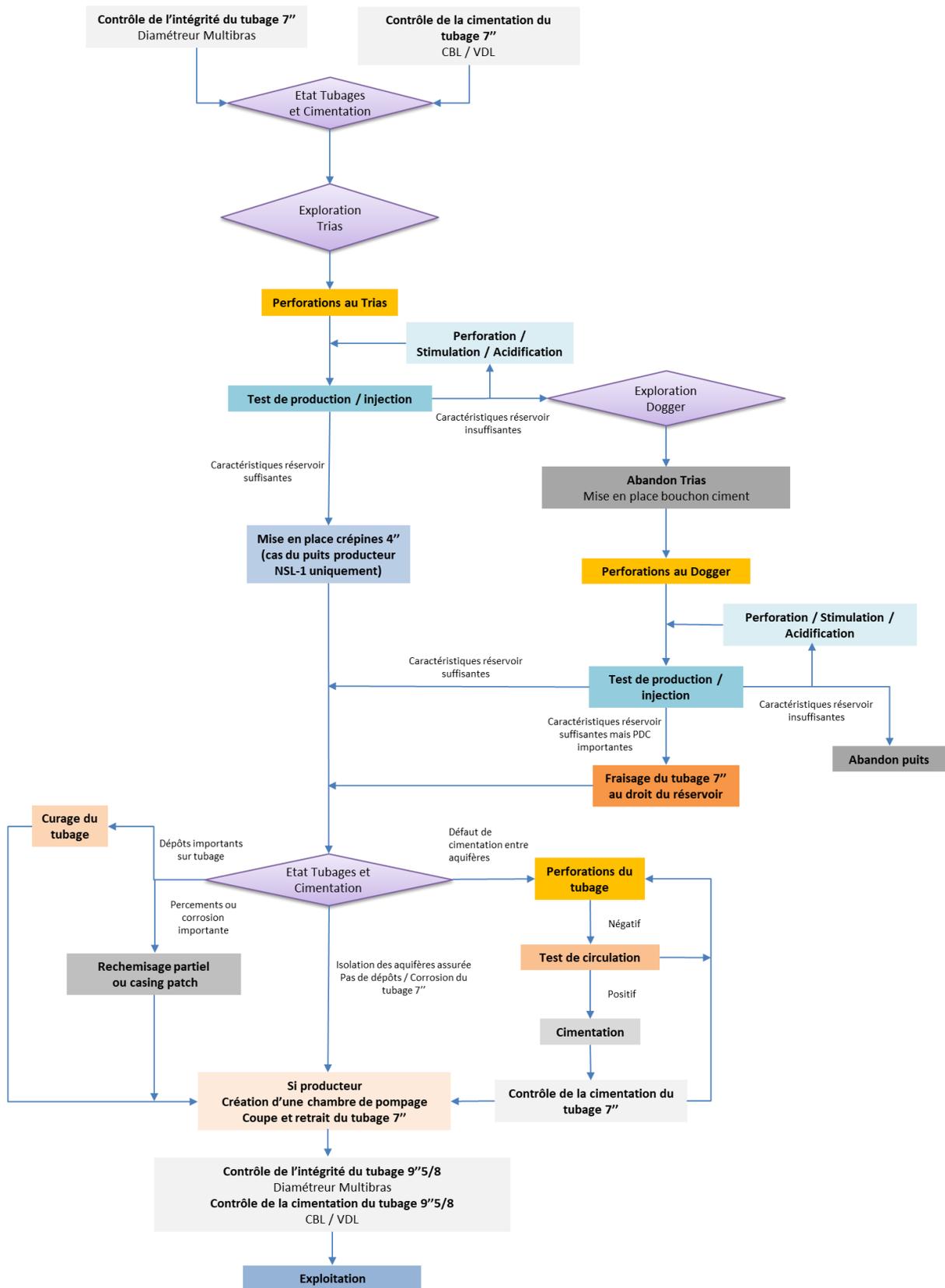


Figure 12 : Logigramme des travaux de reconversion sur le puits NSL-1 ou NSL-2.

### 2.3.4. Cas de reconversion de forages « actifs » : exemple de la reconversion en boucle fermée du forage Les Pins LPS-4 (33)

#### **Caractéristiques générales du forage et cible pétrolière**

Le forage de Les Pins LPS-4 est un forage d'extension dévié, réalisé en 1995, et ayant atteint les grès du Puberckien, dans le Jurassique supérieur du Bassin aquitain. Les caractéristiques techniques des forages sont synthétisées ci-après (Tableau 5 et Tableau 6).

Forage	LPS-4
XL_93 tête de puits	370072
YL_93 tête de puits	6403126
XL_93 fonds de puits	368734
YL_93 fonds de puits	6405008
Profondeur forée	3925 m
KOP	141 m
Inclinaison maximale	54,4 à 2100 m 22,8 à 3914 m
Azimut	328
Déplacement horizontal	1881 m

Tableau 5 : Caractéristiques géométriques du forage LPS-4.

Phase de forage	Profondeur forée (m)	Tubages	Côte sabot (m)	Hauteurs cimentées
26"	25-117	18"5/8	117	toute la hauteur
17"1/2	117-914	13"3/8	909	toute la hauteur
12"1/4	914-2796	7"	-	toute la hauteur
8"1/2	2796-3925	7"	3923	toute la hauteur

Tableau 6 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LPS-4.

Le tubage 7" a été perforé entre 3856 et 3885 m de profondeur avec 7 séries de perforations de 1 à 4 m.

#### **Analyse technico-économique de la reconversion en boucle fermée**

Dans ce cas, a été étudiée la pertinence technico-économique de la reconversion du forage en échangeur géothermique en boucle fermée (i.e. en sonde géothermique verticale coaxiale). La reconversion consiste à descendre un tube dans le forage, le liquide caloporteur (de l'eau) descendant par l'annulaire extérieur, se réchauffant au contact de la roche, et remontant dans le tube central. L'eau a été retenue comme fluide caloporteur du fait de son faible coût et de sa

capacité calorifique élevée. Ce fluide caloporteur a aussi été choisi pour la sonde profonde de Weggis (en Suisse), où on dispose de plusieurs années de retour d'expérience (Eugster *et al.*, 2003 ; Kohl *et al.*, 2002; Maragna *et al.*, 2012). L'échangeur géothermique doit être couplé à une pompe à chaleur (PAC), afin de garantir un niveau de température suffisant pour chauffer le bâtiment. On a cherché à déterminer la quantité maximale de chaleur que pourrait fournir une telle PAC et l'investissement de la reconversion. Surtout, on compare cet investissement à une « solution de référence » bien maîtrisée qu'est le champ de sondes.

Le forage LPS-4 est équipé d'un tubage 7" sur toute sa longueur. Trois technologies de tubage ont été comparées : composite 4"1/2, composite 5" et des tubes isolés ou « *Vaccum Insulated Tubing* »<sup>5</sup> (VIT). Cette dernière option a rapidement été abandonnée du fait de l'épaisseur du VIT, qui provoque des pertes de charge significatives, et de son probable surcoût. Le composite 5" a été abandonné car l'annulaire est réduit, ce qui entraîne des pertes de charge significatives. On a donc retenu le composite 4"1/2 (cf. Figure 13).

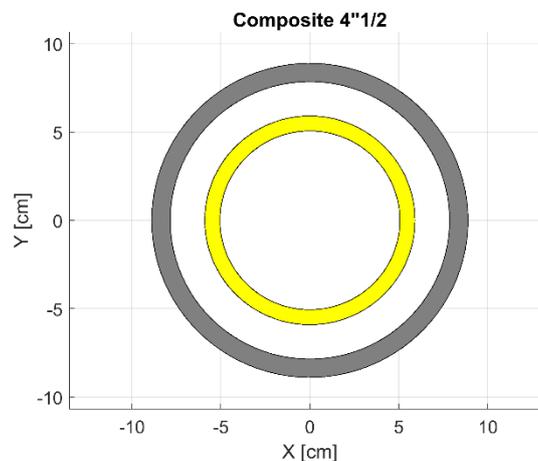


Figure 13 : Vue en coupe du forage (tubage 7" en gris) avec le tube en composite 4"1/2 (en jaune). Schéma à l'échelle.

Le programme de travaux proposé ci-dessous a pour but de s'assurer du bon état des tubages et de leurs cimentations qui est un préalable à la reconversion d'un ouvrage.

L'état du forage LCX4 est connu en date d'octobre 2014, date de la dernière intervention et mise en conformité par l'opérateur Vermilion qui a consisté en un test en pression du casing 7" le 7 octobre 2014 à 35, 50 puis 70 bar pendant 20 minutes qui s'est montré positif. Le contrôle de la cimentation correspond à la diagraphie d'origine (Log CBL du 5 février 1996) avec une cimentation en 3 étages de qualité satisfaisante. Enfin, le casing, pendant la phase d'injection (1999 à 2012), a été protégé par un packer de fond avec de l'eau sodique dans l'espace annulaire.

Le programme de travaux sur la reconversion en boucle fermée du puits LPS-4 est synthétisé dans la Figure 14. Les différentes phases sont :

- Diagnostic de l'état des tubages

La première étape des travaux sur le forage LPS-4 consistera à établir le diagnostic de l'état du tubage 7", à partir de la réalisation des mesures de diagraphies (diamètreur et contrôle de cimentation).

<sup>5</sup> Cf. par exemple [https://www.petrotenenergy.com/product/Vacuum\\_Insulated\\_Tubing\\_and\\_Casing.html](https://www.petrotenenergy.com/product/Vacuum_Insulated_Tubing_and_Casing.html)

- Remédiation des tubages

En fonction des résultats de l'état des tubages et des cimentations, les solutions de remédiation suivantes pourront être mises en place :

- en cas de défaut de cimentation entre aquifère, des perforations du tubage de part et d'autre de l'intervalle à cimenter. Si la circulation à l'extérieur du tubage n'est pas établie entre les deux séries de perforations, de nouvelles perforations seront réalisées. Lorsque la circulation sera établie, la cimentation de l'espace annulaire sera réalisée sous packer ;
- en cas de présence de dépôts importants sur la surface du tubage, un curage sera effectué ;
- en cas de percements et/ou de corrosion importante du tubage, en raison de l'impossibilité technique de diminuer le diamètre intérieur pour permettre la descente du tubage en fibre de verre, le projet sera abandonné.

Le diagnostic de l'état du puits établi sur les dernières diagraphies acquises montre que la probabilité de procéder aux solutions de remédiation est toutefois faible.

- Isolation du fonds du puits par un bouchon de ciment

Un bouchon de ciment sera mis en place à la profondeur choisie de descente du tubage composite. Il permettra d'isoler l'échangeur vertical de la partie basse du forage.

- Descente du tubage de l'échangeur géothermique

Le tube choisi pour la reconversion du puits en échangeur vertical est un tubage en fibre de verre ayant les caractéristiques suivantes (Tableau 7) :

Diamètre nominal (pouce)	Diamètre interne (mm)	Diamètre externe (mm)	Diamètre externe maximal (mm)	Poids (kg/m)
4,5"	101,2 mm	118,2 mm	154,8 mm	6,1 kg/m

Tableau 7 : Caractéristiques du tubage en fibre de verre.

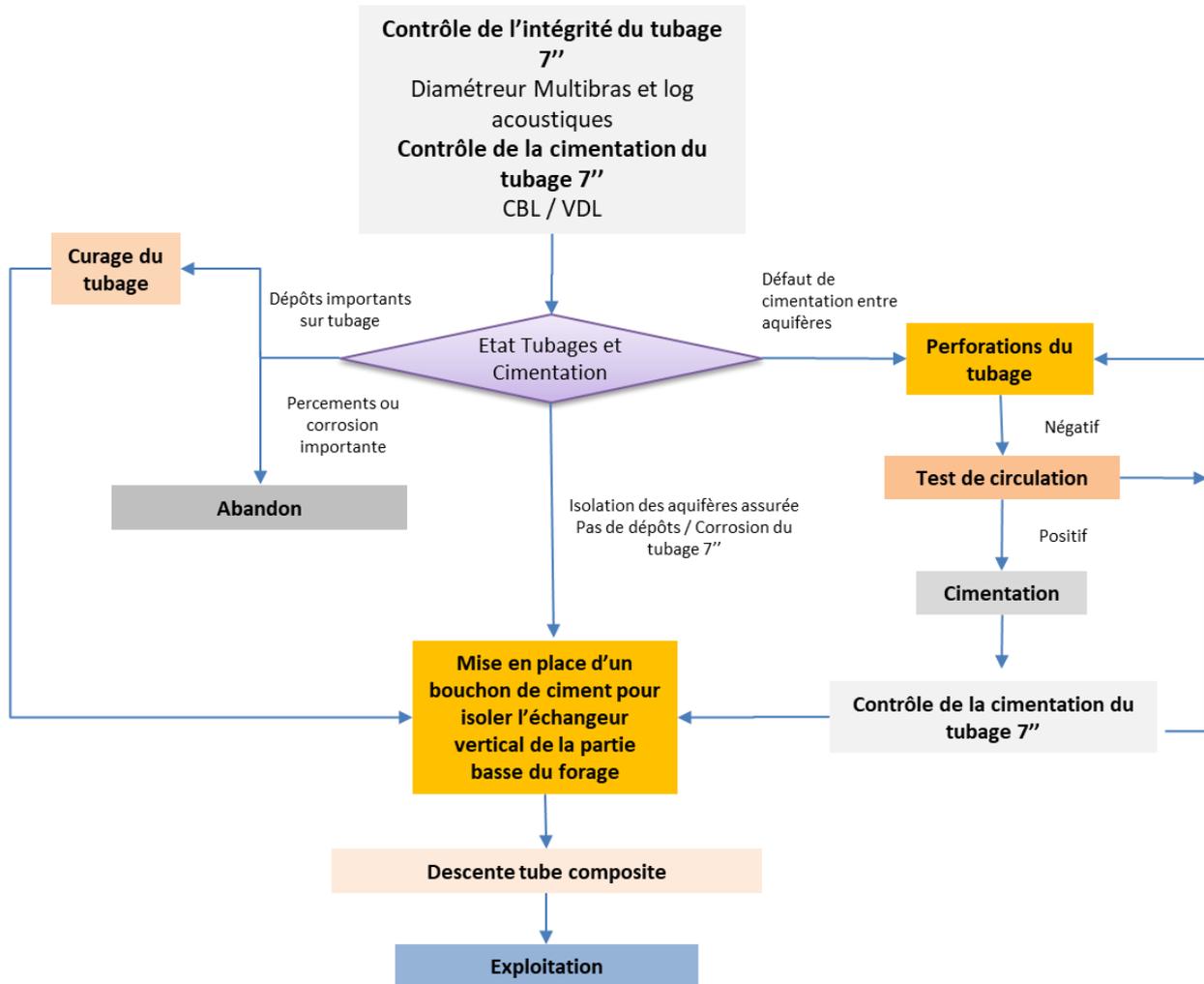


Figure 14 : Logigramme des travaux envisagés au puits LPS-4.

La température initiale le long du forage a été estimée en interpolant les cartes de températures à 1 000 m, 2 000 m et 3 000 m de profondeur produites par Bonté *et al.*, (2010). Dans la première partie du forage, le gradient géothermique « effectif » (mesuré le long du forage) moyen est de  $\approx 25 \text{ }^\circ\text{C} / \text{km}$  (cf. Figure 15). En revanche, sur la seconde moitié du forage (au-delà de  $\approx 2 \text{ km}$ ), le gradient effectif n'est que de  $\approx 10 \text{ }^\circ\text{C} / \text{km}$ , du fait de la déviation. À ce stade, ce constat préliminaire peut laisser penser que le LPS-4 se prête peu à la reconversion. Néanmoins, on verra qu'en raison des pertes de charge, la longueur équipée optimale, du point de vue énergétique, se trouve aux alentours de 2,2 km, soit en-deçà de cette seconde zone.

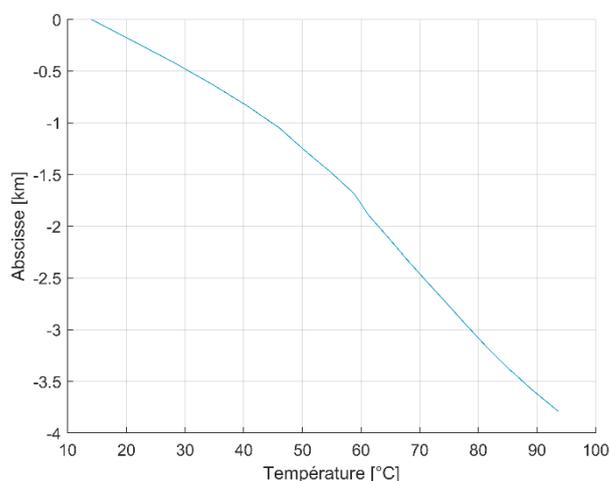


Figure 15 : LPS-4 - Estimation de la l'évolution de la température avec l'abscisse en mètres déviés (position le long du forage).

Le modèle développé précédemment (projet PETROVAL, BRGM/RP-68593-FR) a été utilisé pour estimer la quantité maximale de chaleur que pourrait fournir la PAC pour plusieurs valeurs de longueur de forage équipée (Tableau 8).

<b>Casing 7" métallique</b>	Rayon interne [cm]	7,86
	Épaisseur [cm]	1,04
	Conductivité thermique [W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	40
<b>Tube central 4"1/2 en composite</b>	Conductivité thermique [W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	0,3
	Rayon interne du tube [cm]	5,06
	Rayon externe du tube [cm]	5,91
<b>Roche encaissante</b>	Capacité calorifique volumique [MJ/K/m <sup>3</sup> ] <sup>(a)</sup>	2,20
	Conductivité thermique [W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ] <sup>(a)</sup>	2,2
<b>Caractéristiques du besoin et de l'installation de surface</b>	Ratio d'ECS dans la production d'énergie thermique [-]	0,3
	Température de production du chauffage [°C]	35
	Température de production de l'ECS [°C]	50
	Rendement du circulateur [-]	0,8
	Écart de température minimal à l'évaporateur de la PAC [°C]	4
	Écart de température maximal à l'évaporateur de la PAC [°C]	8

Tableau 8 : Paramètres retenus pour les simulations numériques.

<sup>(a)</sup> Valeur conservative pour des roches sédimentaires (cf. par ex. SIA-384/6)

Ce modèle permet de calculer, au pas de temps de 2,5 h, la température le long de l'échangeur géothermique. On suppose que la totalité du besoin thermique est fournie par la pompe à chaleur géothermique. L'échange entre le liquide caloporteur et l'encaissant, ainsi qu'entre le liquide descendant et montant (court-circuit thermique), sont pris en compte. Le modèle comporte un algorithme permettant d'optimiser le débit géothermique afin de trouver le meilleur compromis entre pertes de charge et performance de la PAC, ou de manière équivalente, l'écart de température à l'évaporateur de la PAC, ici entre 4 °C et 8 °C. La production de la PAC se décompose en ECS (30 % de la consommation du bâtiment) tout au long de l'année et du chauffage en hiver (70 % de la consommation).

Un exemple de résultat est représenté en Figure 16. On observe d'année en année une légère diminution de la température due à un refroidissement de l'encaissant (sous-fig b.), d'où une diminution des performances de la PAC (sous-fig. d.) et une augmentation des consommations de la PAC (sous-fig. c.). La température de retour au forage (sortie d'évaporateur, courbe bleue sur la sous-fig. b.) est de l'ordre de 5 °C en hiver, et de 15 °C en mi-saison, lorsque la pompe à chaleur soutire moins de chaleur, entraînant un moindre refroidissement de l'encaissant. Enfin, pour ce cas, la consommation du circulateur reste négligeable devant la consommation du compresseur.

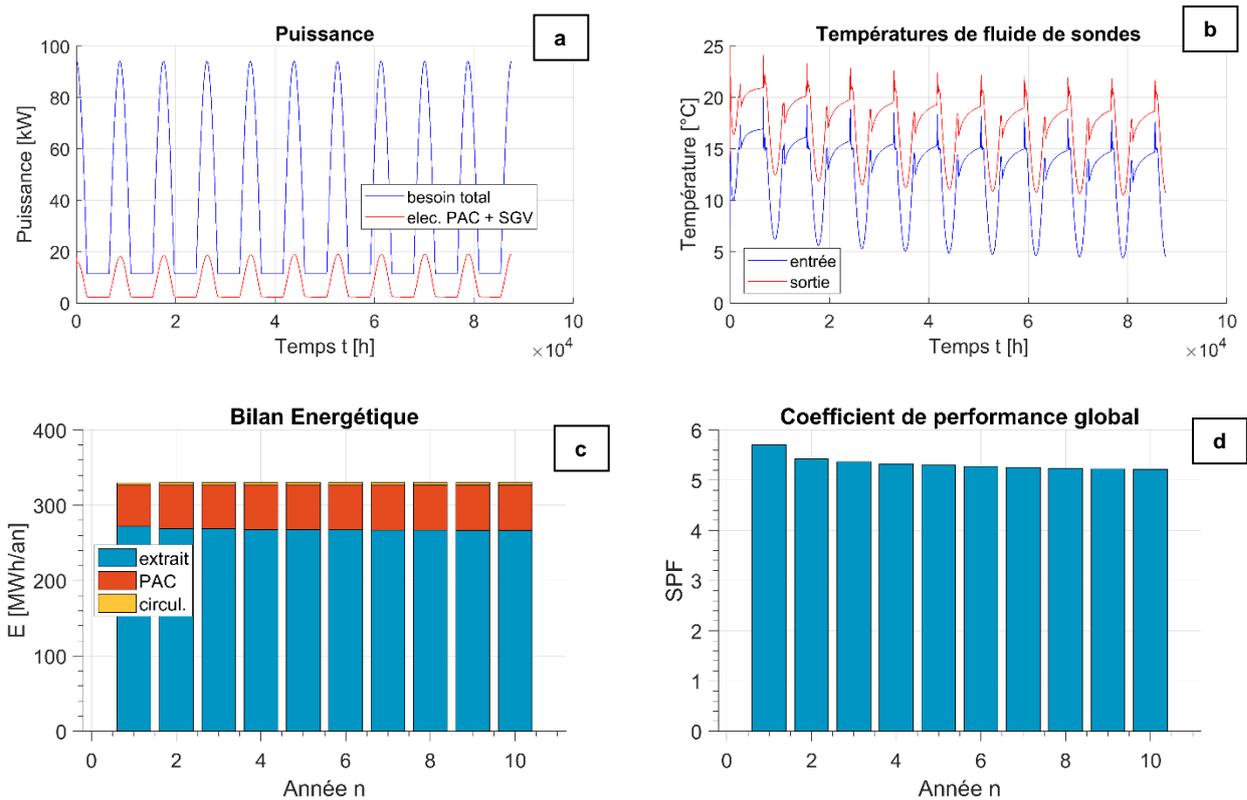


Figure 16 : Exemple de résultats de la simulation thermique dynamique, pour  $L = 1100$  m et  $e = 300$  kWh/ml/a.  
 a : Évolution sur 10 ans de la puissance fournie par la PAC au bâtiment et de la consommation électrique totale (i.e. compresseur de la PAC et circulateur). b : Évolution des températures en entrée/sortie de l'échangeur géothermique. c : Bilan énergétique annuel (bleu : énergie « frigorifique » extraite du terrain, rouge : consommation du compresseur, jaune : consommation du circulateur). d : Coefficient de performance annuel (= SPF).

Une étude de sensibilité sur la longueur équipée  $L$  [m] et l'énergie fournie par la PAC  $e$  [kWh/a] ramenée au mètre de forage [kWh/ml/a] (26 simulations), a été menée afin de déterminer, à la 10<sup>ème</sup> année de fonctionnement :

- la température minimale dans l'échangeur ;
- le coefficient de performance annuel (ou *seasonal performance factor*, SPF) ;
- la part de la consommation électrique du circulateur dans la consommation électrique totale.

Pour chaque grandeur, un polynôme d'ordre 3 (à 8 coefficients) est ajusté sur les résultats de 26 simulations. Ces polynômes (ou « méta-modèles » ou « proxy ») permettent de reproduire assez fidèlement les valeurs observées (cf. Figure 17), sans avoir besoin d'exécuter, de nouveau, le modèle numérique pour chaque nouveau jeu de paramètres.

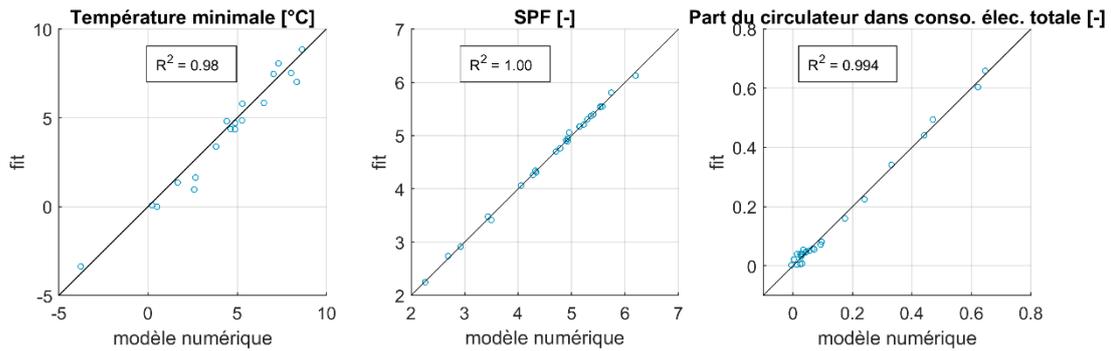


Figure 17 : Comparaison entre modèle numérique et polynôme ajusté pour les 3 grandeurs d'intérêt.

Pour chaque longueur équipée de 500 m à 3 000 m, on peut estimer la quantité de chaleur maximale que peut fournir la PAC telle que, à la 10<sup>ème</sup> année, les deux contraintes suivantes sont respectées :

- la température minimale dans l'échangeur est supérieure à +3 °C, afin de fonctionner à l'eau claire, et ainsi maintenir des pertes de charge acceptables ;
- le SPF est supérieur à 4.

Globalement, un échangeur plus long permet de fournir plus de chaleur par mètre (cf. Figure 18). La demande annuelle ramenée au linéaire de forage est maximale pour 2 200 m. Jusqu'à 2 200 m, la 1<sup>ère</sup> contrainte est limitante. Au-delà, les pertes de charges ne sont plus négligeables, tenter d'augmenter la longueur équipée et le ratio d'extraction se heurte à la seconde contrainte, si bien que la fourniture de la PAC plafonne à 1 300 MWh/an pour une longueur équipée de 2 500 à 3 000 m (cf. Figure 19).

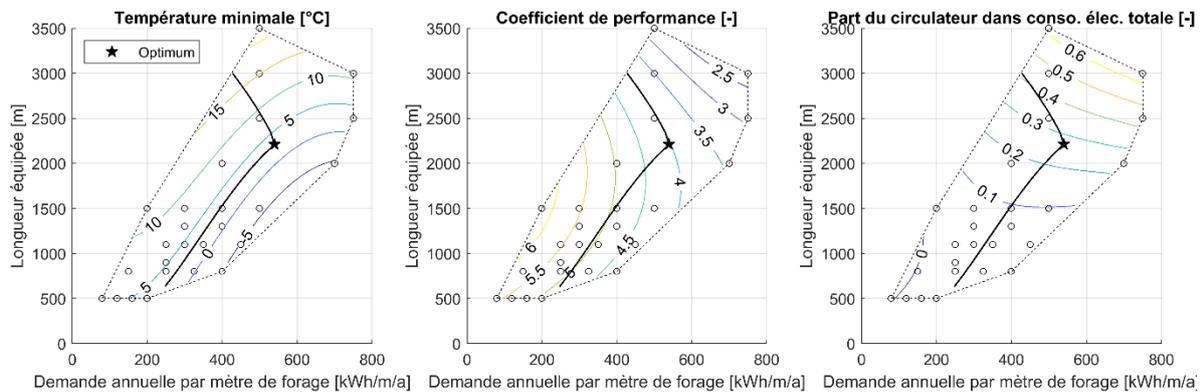


Figure 18 : LPS-4 - Température minimale (à gauche), coefficient de performance SPF (au centre) et part de la consommation électrique du circulateur dans la consommation électrique totale (à droite) à la 10<sup>ème</sup> année de fonctionnement. Les points représentent les évaluations du modèle numérique ; la ligne noire l'extraction linéaire pour une profondeur donnée.

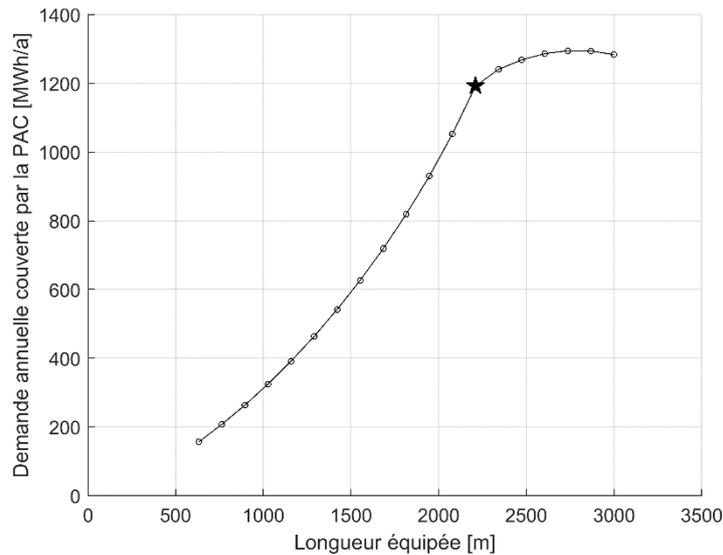


Figure 19 : LPS-4 - Quantité de chaleur fournie par le PAC géothermique en fonction de la longueur équipée, pour la ligne noire et l'optimum technique représentés en Figure 18.

Le Tableau 9 synthétise les coûts des différents items pour la reconversion de l'ouvrage en échangeur géothermique co-axial.

<b>Coûts fixes</b>	Amené repli machine	120 k€
	Aménagement plateforme	15 k€
	Diagraphie CBI et MIT	40 k€
	Tête de puits	15 k€
	Bouchon de ciment	55 k€
<b>Tubages composite (matériel)</b>	Fourniture	50 €/ml
	Transport / livraison	30 à 60 k€
	Centreurs et colliers	10 à 25 k€
<b>Descente des tubages</b>	Temps machine	10 €/ml
	Vissage tube	6 à 15 k€
<b>Coûts supplémentaires</b>	Si problème de cimentation : perforation et reprise cimentation + contrôle cimentation (par reprise de cimentation)	35 + 20 k€
	Si problème de dépôts : curage du tubage	80 k€

Tableau 9 : Coût de transformation de LPS-4 en échangeur géothermique.

Parallèlement, une longueur de sonde géothermique verticale « classique » (double-U de 100 à 200 m de profondeur) a été estimée à l'aide de la méthode ASHRAE pour couvrir le même besoin (cf. Tableau 10). On suppose que les sondes traversent des formations géologiques similaires (propriétés thermiques identiques). Le champ de sondes est assimilé à une unique sonde : les interactions entre sondes ne sont pas prises en compte, car ces interactions dépendent de la localisation précise des forages, et donc des contraintes foncières propres à chaque projet. Prendre en compte ces interactions revient à augmenter la longueur forée et donc l'investissement. On estime ainsi, en première approximation, que chaque mètre de sonde peut fournir 120 kWh/ml/an.

<b>Prélèvement au terrain</b>	Puissance maximum sur 6 h consécutives, par mètre de forage [W/m]	85,5
	Puissance maximum sur 1 mois, par mètre de forage [W/m]	84,7
	Puissance moyenne annuelle par mètre de forage [W/m]	34,2
<b>Roche encaissante</b>	Capacité calorifique volumique [MJ/K/m <sup>3</sup> ]	2,20
	Conductivité thermique [W/(K.m)]	2,2
	Température initiale [°C]	15,0
<b>Sonde géothermique</b>	Résistance thermique [K.m/W]	0,08
	Rayon [cm]	8
<b>PAC</b>	Ecart de température de la PAC [°C]	3
	SPF [-]	4
<b>Coût</b>	Coût du mètre linéaire foré [€/ml]	60

Tableau 10 : Paramètres retenus pour le dimensionnement du champ de sondes à l'aide de la méthode ASHRAE.

L'investissement pour la reconversion de LPS-4 est comparé à l'investissement pour la création du champ de sondes. Il ne s'agit aucunement de calculer un coût complet, mais d'estimer l'investissement pour une quantité de chaleur livrée par la PAC, calculé sur 25 années consécutives (Figure 20). Seul l'investissement dans le forage est pris en compte, mais pas dans la PAC, qui serait similaire dans les deux configurations. Le coût n'est pas actualisé, et on ne prend en compte ni l'électricité nécessaire au fonctionnement de la PAC et des circulateurs, ni l'entretien. En effet, on estime que dans les deux cas, le SPF est de l'ordre de 4.

Dans le scénario le plus optimiste concernant l'état du puits (qui ne nécessite ni curage, ni recimentation), **la reconversion est plus intéressante que la construction du champ de sonde, dès que la longueur équipée dépasse 1 700 m (soit un besoin annuel de 800 MWh/an environ), et est particulièrement justifiée pour une longueur atteignant 2 200 m, pour une fourniture de l'ordre de 1 200 à 1 300 MWh/an.**

Il est à noter qu'il est probable que le tubage 7" soit en bon état et ne nécessite pas de travaux de work-over, dans la mesure où, pendant l'exploitation, les hydrocarbures ne sont pas en contact direct avec le casing métallique, mais remonte dans un tubing.

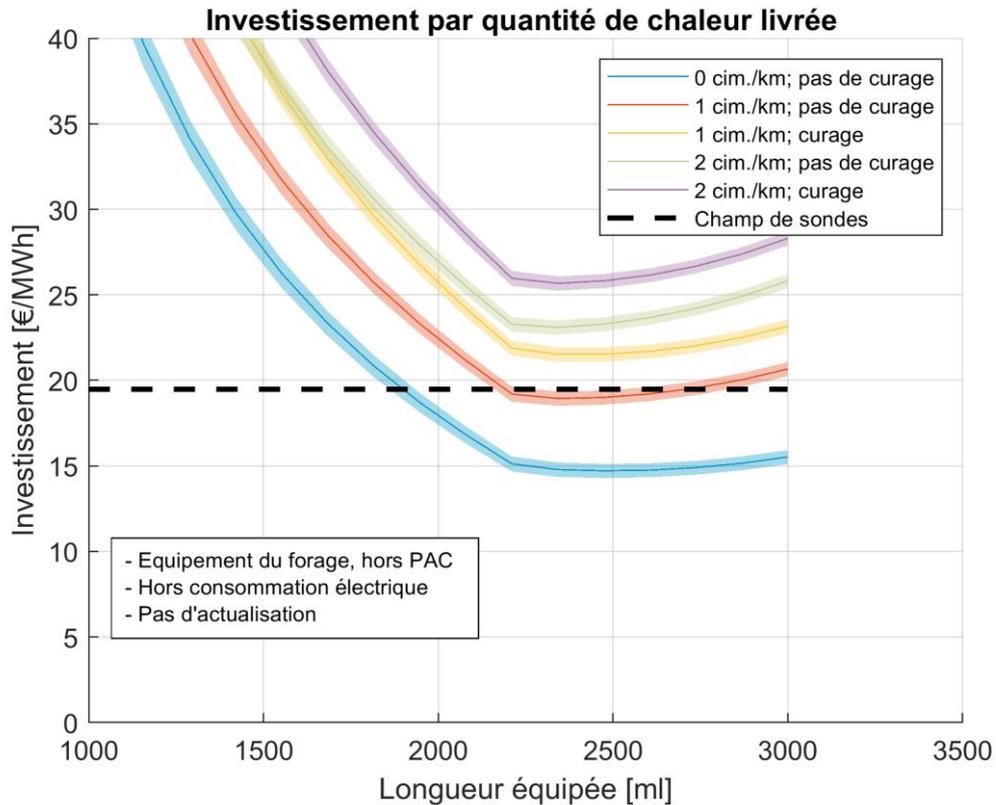


Figure 20 : LPS-4 - Pertinence économique de la reconversion en boucle fermée : estimation de l'investissement par quantité de chaleur livrée, pour différents scénarios de reprise de cimentation choisis de manière arbitraire (0,1 ou 2 cimentation/km de forage) et curage (avec ou sans), et comparaison avec un champ de sonde. Calcul économiques sur 25 années.

### 2.3.5. Cas de reconversion de forages bouchés : exemple de la reconversion en boucle ouverte des forages de la Croix-Blanche LCX-2 et LCX-4 (91)

#### Caractéristiques générales des forages et cible pétrolière

Le forage LCX-2 (aussi appelé LCX-2D) est un forage d'extension dévié réalisé en 1990 et ayant atteint le socle, avec comme cible pétrolière, les grès de Boissy du Trias supérieur du Bassin de Paris. Le forage LCX-4 (aussi appelé LCX-4DG) est un forage d'extension dévié réalisé en 1993, avec une reprise initiale en side-track de la phase 8"1/2 à 1 047 m, et ayant ciblé, de même, les grès de Boissy. Les impacts entre les deux forages sont espacés de 995 m.

Les caractéristiques techniques des forages sont synthétisées ci-après (Tableau 11, Tableau 12 et Tableau 13).

Forages	LCX-2D	LCX-4DG
XL_93 tête de puits	650893	650897
YL_93 tête de puits	6834973	6834962
XL_93 fonds de puits	650582	651263
YL_93 fonds de puits	6835633	6834907
Profondeur forée	2145 m	2005 m
KOP	250	297
Inclinaison maximale / finale	42° à 1395 m / 18°	23° à 1047 m / 0,4°
Azimut final	332	110
Déplacement horizontal	730 m	372

Tableau 11 : Caractéristiques géométriques des forages LCX-2 et LCX-4.

Phases de forage	Profondeur forée (m)	Tubages	Côte sabot (m)	Hauteurs cimentées
12"1/4	0-25	7"	-	0-25
8"1/2	25-223	7"	220,5	25-223
6"	223-2145	OH	-	-

Tableau 12 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LCX-2.

Phase de forage	Profondeur forée (m)	Tubages	Côte sabot (m)	Hauteurs cimentées
12"1/4	0-790	9"5/8	783	0-783
8"1/2	790-2005	7"	2000	1250-1678 1815-2000

Tableau 13 : Phases de forage, tubages et hauteurs cimentées de LCX-4.

L'analyse combinée des diagraphies et mesures pétro-physiques sur carottes indique des caractéristiques des grès de Boissy, cible pétrolière, très différentes d'un forage à l'autre. Au forage LCX-2 (second forage du site de La Croix-Blanche), les caractéristiques réservoirs sont médiocres avec une porosité moyenne de 7 % et une perméabilité moyenne de 15 mD, sans indices d'huiles ayant conduit à la fermeture définitive du forage. Au forage LCX-4DG (quatrième forage de La Croix-Blanche avec *side-track*), les caractéristiques réservoirs sont très bonnes avec une porosité moyenne de 18 % et une perméabilité moyenne de 670 mD.

Concernant les formations traversées présentant un intérêt potentiel pour la reconversion en boucle ouverte, au forage LCX-2, les calcaires du Bathonien ont été recoupés à 1 690 m de profondeur forée (-1 460 m NGF), avec une épaisseur totale de 120 m (mesure déviée). Les grès du Chaunoy ont été rencontrés à 2 117 m de profondeur forée (-1 851 m NGF), sur une épaisseur totale de 27 m déviée.

Au forage LCX-4, les calcaires du Bathonien ont été recoupés à 1 605,8 m de profondeur forée (-1 457,8 m NGF), avec une épaisseur totale de 105,8 m. Les grès du Chaunoy ont été rencontrés à 1 993,2 m de profondeur (-1 846 m NGF), sur une épaisseur totale de 11,8 m.

### ***Travaux de fermeture des ouvrages***

Le forage LCX-2D a été bouché, dès l'origine, du fait des caractéristiques médiocres pour l'exploitation des grès de Boissy, ciblés pour la recherche d'hydrocarbures. Quatre bouchons de ciment sont alors répartis de la manière suivante (Figure 21) :

- de 2 135 à 2 000 m vis-à-vis du Trias ;
- de 1 827 à 1 627 m vis à vis du Dogger ;
- de 776 à 540 m vis-à-vis de l'Albien-Néocomien ;
- de 350 à 147 m.

Le forage LCX-4DG a été définitivement bouché en mars 1997, avec la mise en place de quatre bouchons de ciment répartis de la manière suivante (Figure 22) :

- de 1 960 à 1 903 m au-dessus du Trias ;
- de 1 761 à 1 553 m vis à vis du Bathonien ;
- de 972 à 570 m vis-à-vis de l'Albien-Néocomien ;
- de 100 m à la surface.

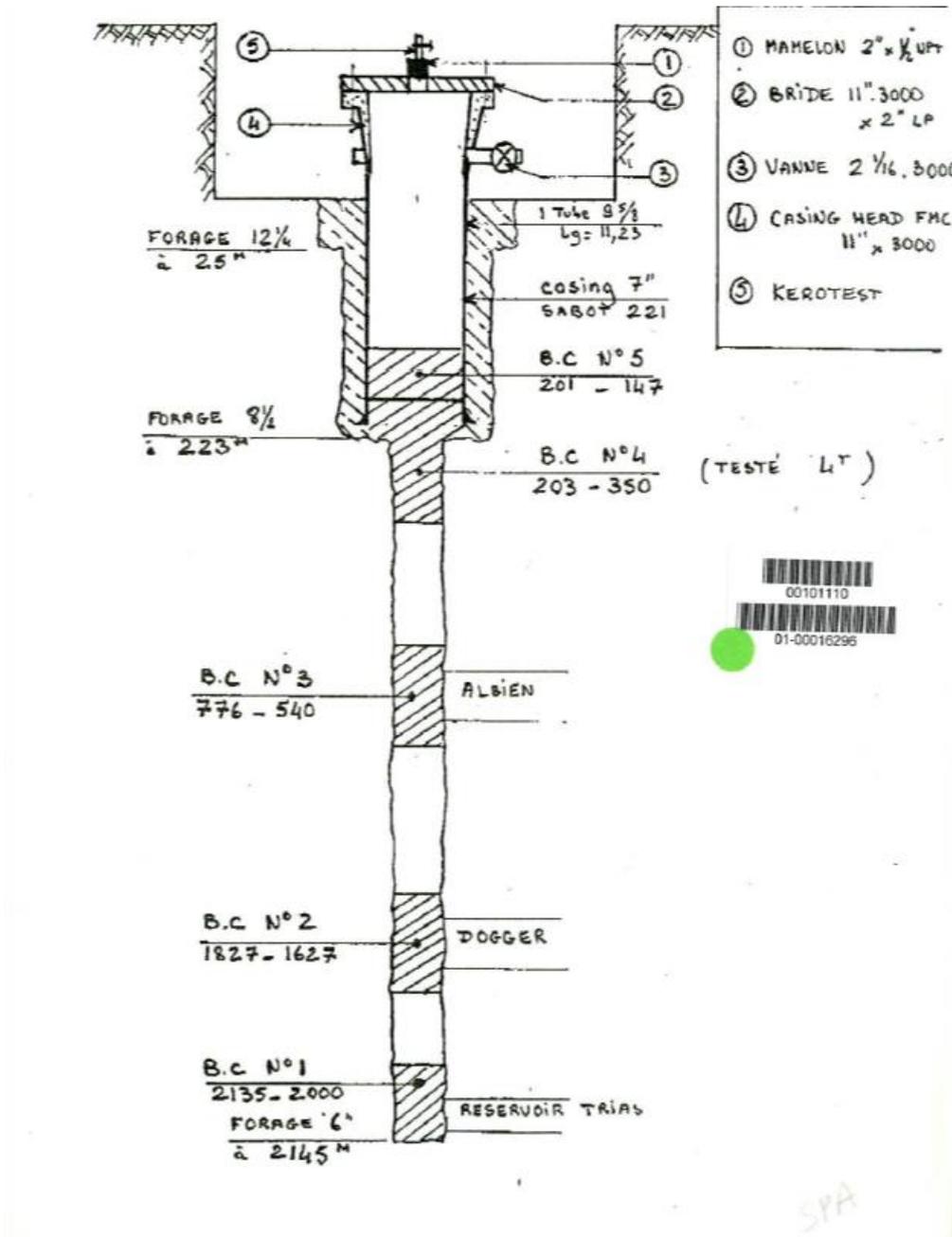


Figure 21 : Coupe technique du puits LCX-2D, après bouchage (source : Vermilion).

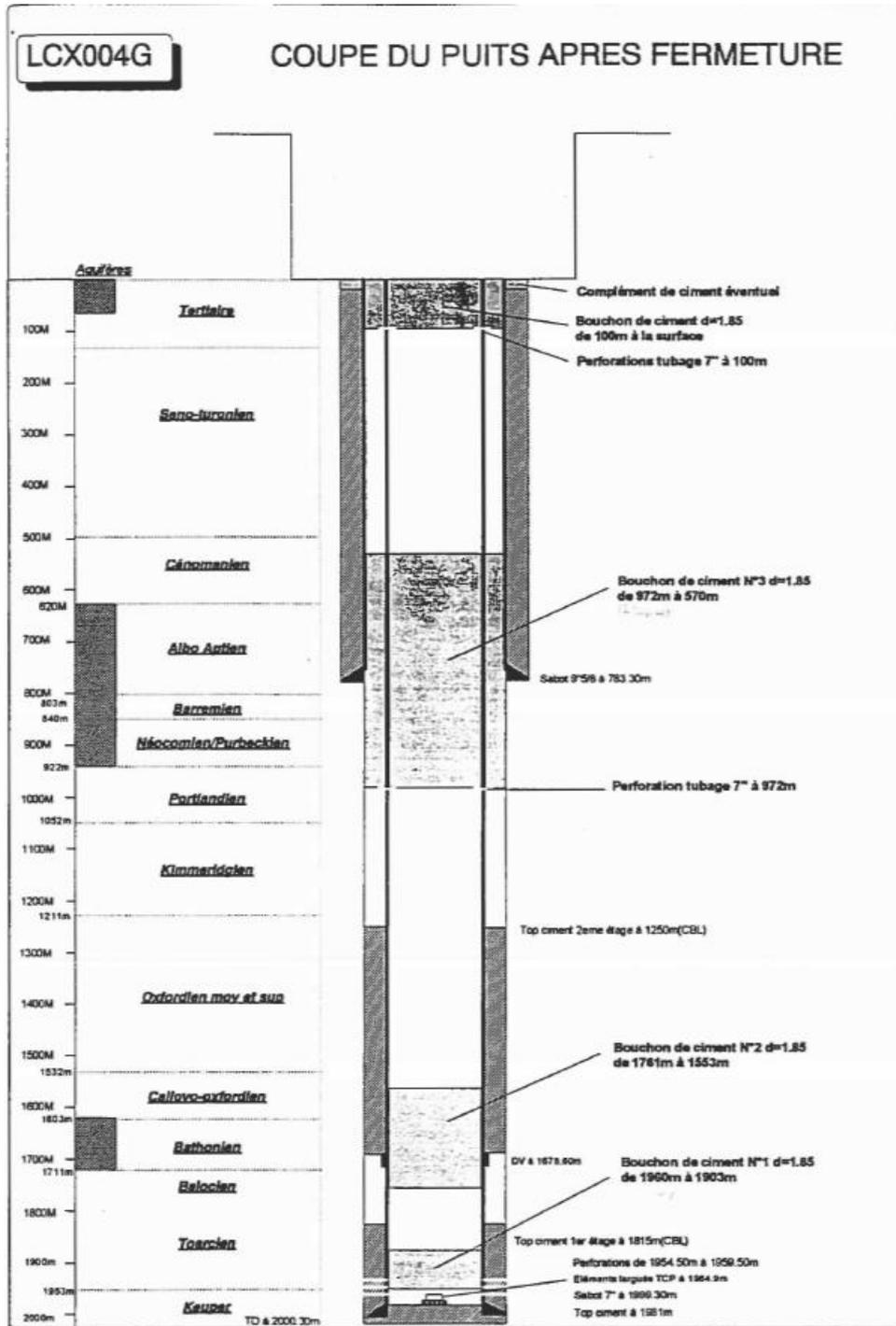


Figure 22 : Coupe technique du puits LCX-4DG, après bouchage (source : Vermilion).

## **Analyse technico-économique de la reconversion en boucle ouverte**

### **Forage LCX-2**

Le forage LCX-2 présente la particularité d'avoir été foré en diamètre 6" et en une seule phase, de 223 à 2145 m de profondeur, traversant les formations de l'Albien, du Néocomien, de Lusitanien, du Dogger et du Trias. Aucun tubage n'a été positionné dans le puits avant sa fermeture par les bouchons de ciment.

La nécessité d'isoler ces différents aquifères pour l'exploitation du puits et le faible diamètre de forage n'offre pas de solution technique pour la reconversion de ce puits en forage géothermique.

### **Forage LCX-4**

À la différence du puits LCX-2, le forage LCX-4 est équipé d'un tubage 7" partiellement cimenté. Le forage LCX-4 est proposé comme forage injecteur du doublet, le forage d'un nouveau puits producteur demeurant nécessaire, compte-tenu de l'indisponibilité du puits LCX-2. La viabilité de la reconversion en doublet nécessitera toutefois de caractériser également, au forage LCX-4, les transmissivités et températures au Trias et Dogger.

Le logigramme des travaux de reconversion est illustré dans la Figure 23.

Les différentes étapes préliminaires à la reconversion sont :

- Reforage des bouchons de ciment

Après mise en place de la machine de work-over (capacité minimale 60 tonnes), le reforage des bouchons de ciment sera effectué.

- Diagnostic de l'état des tubages

Le diagnostic de l'état du tubage 7", à partir de la réalisation des mesures de diagraphies (diamètreur et contrôle de cimentation), sera réalisé après le reforage des bouchons de ciment.

- Tests des formations du Trias

Des perforations au droit des formations ciblées du Trias seront réalisées. L'emplacement et le nombre de perforations seront déterminés, à partir de la coupe géologique. En raison du bouchon de ciment de fermeture, les acidifications risquent d'être mises en œuvre au début du développement afin de développer le proche-puits.

Les tests des formations consisteront à réaliser des essais par palier et longue durée en production et en injection, afin de caractériser la température, la transmissivité et l'injectivité du réservoir. Si les caractéristiques (transmissivité et température) du Trias n'étaient pas favorables à la production, le repli au Dogger serait décidé. Dans le cas où ces dernières seraient satisfaisantes, en fonction des résultats d'injectivité, des nouvelles perforations et/ou des stimulations chimiques seront réalisées.

- Repli au Dogger

Si malgré les développements et stimulations, la productivité ou l'injectivité du puits n'était pas satisfaisante, il serait procédé à l'abandon de la partie basse du puits (mise en place d'un bouchon de ciment entre 1 900 et 2 000 m).

Des perforations seront réalisées au droit du Dogger. Les tests d'injection et de production (avec diagraphies de production), couplés à des opérations d'acidification des carbonates, permettront de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir.

3 cas sont envisageables :

- 1) si les caractéristiques du réservoir (transmissivité) ne sont pas suffisantes, malgré les développements entrepris, le projet sera déclaré en échec et le puits abandonné par mise en place des bouchons de ciment ;
- 2) si les caractéristiques du réservoir sont satisfaisantes, mais toutefois que l'écoulement à travers les perforations entraînent des pertes de charge dans le proche puits trop importantes (valeur de skin (effet pariétal) élevée), le fraisage du tubage 7" au niveau du Dogger sera effectué (la hauteur de fraisage sera ajustée en fonction des résultats du profil de débit-métrie verticale) ;
- 3) si les caractéristiques du réservoir et du puits sont satisfaisantes, aucune intervention ne sera réalisée sur le tubage au niveau du réservoir.

- Remédiation des tubages

Afin de satisfaire les obligations réglementaires d'isolation entre aquifère et d'intégrité des tubages, le diagnostic précédemment établi permettra de définir les solutions de remédiation aux désordres identifiés :

- en cas de défaut de cimentation entre aquifère, il sera procédé à des perforations du tubage, de part et d'autre de l'intervalle à cimenter. Si la circulation à l'extérieur du tubage n'est pas établie entre les deux séries de perforations, de nouvelles perforations seront réalisées. Lorsque la circulation sera établie, la cimentation de l'espace annulaire sera réalisée sous packer ;
- en cas de présence de dépôts importants sur la surface du tubage, un curage sera effectué ;
- en cas de percements et/ou de corrosion importante du tubage, il sera procédé à un rechemisage partiel du tubage ou à la mise en place de casing patch. La solution retenue dépendra de l'extension verticale de la partie corrodée.

- Coût prévisionnel

Le coût prévisionnel des différentes phases des travaux de reconversion est synthétisé dans le Tableau 14. Les coûts ne comprennent pas les coûts de Maîtrise d'œuvre (phase d'étude, de consultation des entreprises, de supervision ...) et d'assurance.

**Le coût de reconversion de LCX-4 est estimé pour le Trias, entre 420 et 705 k€, et pour le Dogger, entre 725 et 1 010 k€ HT.**

Il est à noter qu'un second forage serait nécessaire (LCX-2) n'étant pas réutilisable.

Phase	Item	Coût prévisionnel (k€ HT)
Amené-repli machine/ Aménagement plateforme	Amené repli appareil forage	120
	Aménagement plateforme	25
	<b>Sous-total</b>	<b>145</b>
Reforage bouchon ciment	<b>Reforage bouchons de ciment</b>	<b>50</b>
Diagnostic	<b>Diagraphies tubage 7" (diamètreur et CBL/VDL) et interprétation</b>	<b>35</b>
Exploration/Exploitation du Trias	Perforations au Trias	50
	Tests de production et d'injection + diagraphie PLT	80
	Acidification Trias (x2)	60
	<b>Sous-total exploration Trias</b>	<b>190</b>
Exploration/Exploitation du Dogger	Mise en place bouchon Trias	55
	Perforations au Dogger	50
	Acidification Dogger (x2)	50
	Tests de production et d'injection + diagraphie PLT	70
	Fraisage du tubage 7" au dogger	80
	<b>Sous-total exploration Dogger</b>	<b>305</b>
Curage	Curage tubage 7"	80
Reprise Cimentation	Perforations	40
	Cimentation tubage 7"	
	Contrôle cimentation 7"	15
Rechemisage	Casing Patch	150
	Rechemisage tubage 5"	100 - 200
Abandon Dogger	Mise en place bouchon Dogger	55
	<b>Coût minimal reconversion Trias</b>	<b>420</b>
	<b>Coût maximal reconversion Trias</b>	<b>705</b>
	<b>Coût minimal reconversion Dogger</b>	<b>725</b>
	<b>Coût maximal reconversion Dogger</b>	<b>1010</b>

Tableau 14 : Coût de la reconversion de LCX-4 avec fourchette basse et haute.

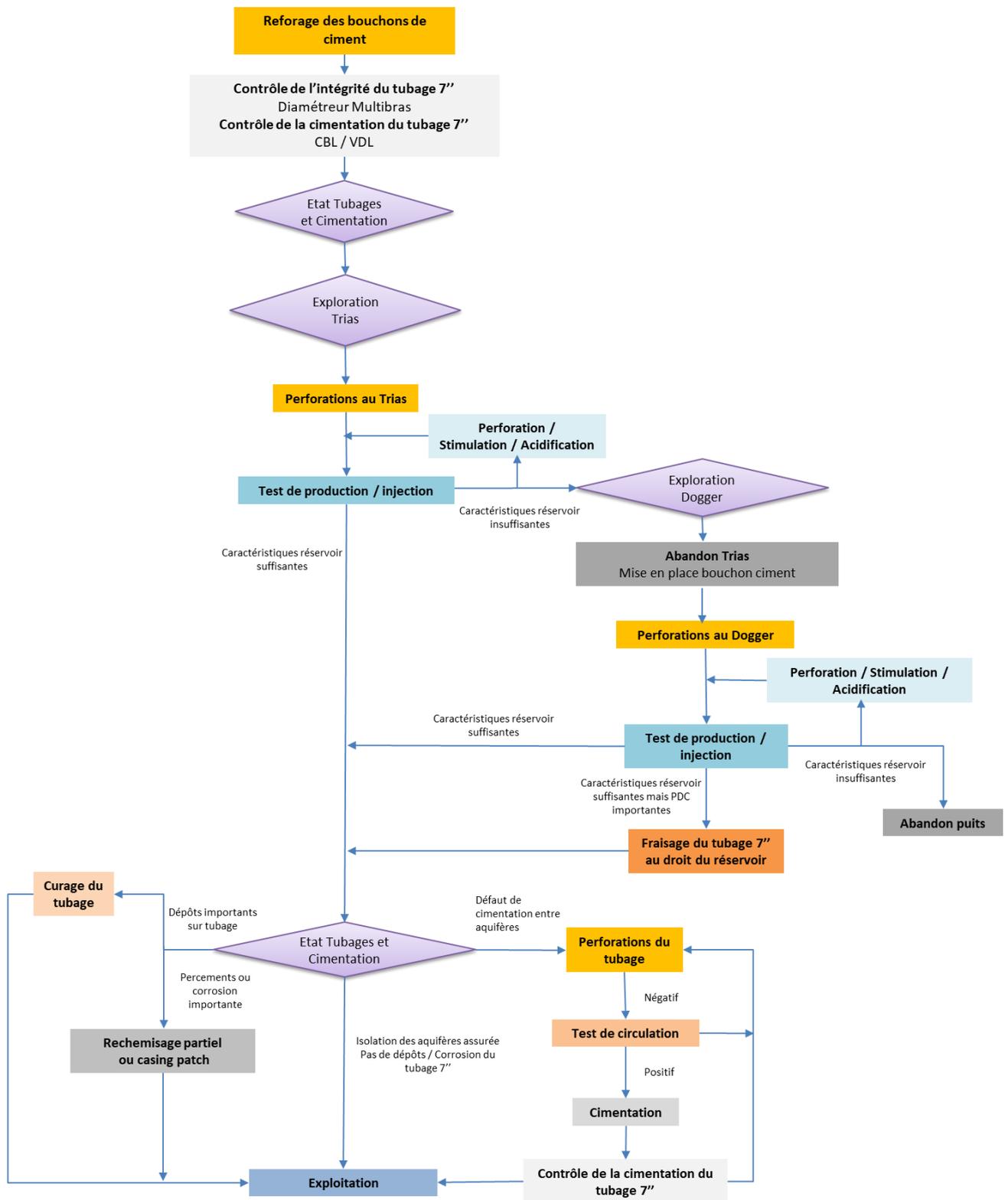


Figure 23 : Logigramme des travaux de reconversion sur le puits LCX-4.

## 2.4. CONCLUSIONS

L'analyse menée sur la reconversion en boucle ouverte des forages NSL-1/NSL-2 de Nesles et LCX-4 de la Croix Blanche indique que les coûts de reconversion d'un forage varient entre 400 et 1 000 k€, selon les travaux à réaliser. Ces coûts sont évidemment à mettre en exergue avec le coût de la réalisation d'un forage neuf au Dogger ou Trias, dont l'ordre de grandeur varie entre 4 000 et 7 000 k€, soit un facteur entre 7 et 10. Néanmoins, il est important de noter également que l'architecture imposée des puits (au mieux tubage 7", voire en 5", s'il y avait besoin de réaliser un rechemisage, suivant l'état effectif des tubages) ne permettra pas d'exploiter à des débits au-delà de 100 m<sup>3</sup>/h (quelques dizaines de m<sup>3</sup>/h), indépendamment des caractéristiques de la formation ciblée. Cela reste toutefois intéressant avec des puissances extractibles suivant la température de la ressource exploitée, entre 0,5 et 5 MW (entre 5 et 15 MW pour un nouveau doublet présentant des diamètres plus conséquents). **Comparativement au coût du MW pour un nouveau doublet, entre 0,5 et 2,8 M€/MW, celui dans le cas de la reconversion de forages pétroliers serait entre 0,2 et 1,6 M€/MW.** La reconversion est donc une solution qui reste intéressante avec, toutefois, les contraintes liées à l'architecture des forages (faible diamètre), leur localisation par rapport à un utilisateur potentiel et la nécessité d'avoir deux forages pas trop éloignés, mais pas trop proches non plus (problème de la percée thermique) pour la production et réinjection du fluide.

L'analyse menée sur la reconversion en boucle fermée du forage LPS-4 suggère que les forages d'exploitation pétrolière de diamètre 7" sont de bons candidats à la reconversion en boucle fermée. Le diamètre du forage (7") semble suffisant pour mettre en place un tubage central en composite tout en maintenant des pertes de charge acceptables. Le coût modéré du composite (60 €/ml de matériel et de pose, plus le coût des accessoires) peut rapidement compenser les coûts fixes de mise en place du tubage (évalué à 190 k€ pour LPS-4), d'autant plus que la chaleur délivrable augmente plus vite que la longueur équipée, du fait de l'augmentation de température du milieu avec la profondeur. Dans le scénario le plus optimiste concernant l'état du puits (qui ne nécessite ni curage, ni recimentation), la reconversion est plus intéressante comparée à la construction d'un champ de sondes, dès que la longueur équipée dépasse 1 700 m (soit un besoin annuel de 800 MWh/an environ), **et est particulièrement justifiée pour une longueur jusqu'à 2 200 m, pour une fourniture de l'ordre de 1 200 à 1 300 MWh/an.** Ces conclusions reposent, néanmoins, sur des modèles numériques, qui mériteraient d'être validés expérimentalement. À ce stade, il apparaît nécessaire d'identifier un démonstrateur ainsi qu'un guichet pour la reconversion d'un ancien forage pétrolier.

De manière générale, si la cimentation d'origine est bonne et dans la mesure que les hydrocarbures exploités ne sont pas en contact direct avec le casing métallique mais remonte dans un liner, il est peu probable que ces forages nécessitent des travaux de curage, rechemisage ou reprise de la cimentation.

Au-delà des seuls aspects du potentiel de reconversion des ouvrages pétroliers pour la production de chaleur (boucle ouverte ou fermée), ces ouvrages peuvent aussi être utilisés comme puits de caractérisation des formations dans les secteurs mal connus car encore non ou peu exploités par la géothermie, et ainsi, apporter des éléments à la connaissance pour l'exploration de nouvelles ressources.

## 3. Étude du potentiel de valorisation géothermique des ouvrages miniers

### 3.1. PRÉAMBULE

Ce chapitre constitue la suite du projet VALGEOMIN de la convention ADEME-BRGM précédente et synthétise l'état des lieux sur le recensement et la caractérisation des émergences minières et puits de mines, ainsi que leur potentiel de valorisation, qui ont fait l'objet d'un rapport spécifique référencé BRGM/RP-69735-FR (Bugarel, 2020).

L'inventaire des ouvrages miniers réalisé dans le présent rapport **ne permet d'avoir qu'une vision partielle du potentiel de valorisation géothermique des eaux minières, à l'échelle du territoire national, limité aux anciens sites miniers surveillés par le BRGM/DPSM pour le compte l'État au titre de l'après-mine**. D'autres ouvrages (émergences minières et puits de mine) existent sur le territoire national, mais ils ne font pas l'objet d'une surveillance particulière du BRGM/DPSM qui ne dispose donc pas de données les concernant.

Les données ponctuelles collectées périodiquement par le BRGM/DPSM sur les sites dont il assure la surveillance ont été utilisées dans le cadre du projet VALOR.

### 3.2. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATION DES ÉMERGENCES MINIÈRES

#### 3.2.1. Synthèse des émergences au niveau national

La Figure 24 synthétise les principales caractéristiques des **83 émergences minières suivies par le BRGM/DPSM sur le territoire national**.

Selon une première approche territoriale d'évaluation du potentiel de valorisation géothermique de ces émergences minières, l'ordre de classement, dans ce tableau synthétique, est donné par le nombre le plus important d'émergences minières au sein des régions, puis des départements. L'ordre de classement des communes et des émergences suit ensuite un ordre alphabétique.

**Les valeurs de débit, de température, de conductivité et de pH renseignées dans ce tableau correspondent à la valeur moyenne des données ponctuelles** recueillies par le BRGM/DPSM.

Un code couleur est appliqué aux données de débit et de température afin d'identifier les émergences minières représentant les potentiels de valorisation géothermique les plus intéressants.

Pour les valeurs de débit, le code couleur est le suivant :

- valeur de **débit moyen supérieure ou égale à 15 m<sup>3</sup>/h en jaune** ;
- valeur de **débit moyen supérieure ou égale à 50 m<sup>3</sup>/h en orange** ;
- valeur de **débit moyen supérieure ou égale à 100 m<sup>3</sup>/h en rouge**.

Pour les valeurs de température, le code couleur est le suivant :

- valeur de **température moyenne supérieure ou égale à 15°C en jaune** ;
- valeur de **température moyenne supérieure ou égale à 20°C en rouge**.

En terme de débit, sur les 83 émergences minières répertoriées, 28 émergences ont un débit moyen supérieur à 15 m<sup>3</sup>/h (soit 34 %), 9 ont un débit supérieur à 50 m<sup>3</sup>/h (11 %) et 7 présentent des débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/h (8 %).

Trois émergences présentent des débits moyens particulièrement importants :

- 360 m<sup>3</sup>/h pour l'émergence de la galerie de Gouvix (Mine de fer de Soumont) localisée sur la commune de Gouvix (14) ;
- 720 m<sup>3</sup>/h pour l'émergence de la galerie du Bois d'Avril (bassin ferrifère lorrain) localisée sur la commune d'Avril (57) ;
- 930 m<sup>3</sup>/h pour l'émergence de galerie de la Mer (bassin houiller de Provence) alimentée par le pompage au puits Gérard situé sur commune de Mimet (13).

En terme de température, sur les 83 émergences minières répertoriées, 30 émergences ont une température moyenne supérieure à 15 °C (36 %) et 8 présentent une température supérieure à 20 °C (10 %).

Région	Département	Gisement minier	Commune	Emergence minière	Nb/Région	Nb/Départ.	Nb/Com.	Débit moyen (m³/h)	Température moyenne (°C)	Conductivité moyenne (µS/cm)	pH moyen	
Occitanie	Gard (30)	Bassin houiller du Gard	Alès	Galerie La Royale 2	36	19	3	0.4	13.7	404	6.2	
				Galerie Nationale				-	-	-	-	
				Galerie Saint-Pierre				4.51	15	571	7.1	
			Bessèges	Galeries Saint-Illyde et Saint-François			1	45	18	1961	7.2	
								21	17.3	833	7.1	
			Chambon	Galerie Cornas			1	19	14.8	670	6.7	
								77	15.9	2028	7.4	
								6.7	14.4	459	6.7	
								138	17.4	1189	6.8	
								24.7	13.8	806	6.8	
								72.7	21.3	2369	6.9	
			Martinet	Galerie des Esteyraings			3	99	20.8	1510	7	
								1.8	12.5	284	7.2	
								10.3	12.4	335	6.6	
	Molières-sur-Cèze	Galerie Chalmeton	2	45.9			15.6	2134	7.4			
				0.1			20.8	5949	7			
	Robiac-Rochessadoule	Galerie Saint-Hyppolite	1	6.8			14.1	994	7.3			
	Saint-Martin-de-Valgaugues	Galerie La Royale	1	-			-	-	-			
	Vernarède	Galerie Burat	1	53.9			16.5	768	7.2			
	Aveyron (12)	Bassin houiller de Decazeville	Aubin	Écoulement Destresse			11	6	0.3	12.6	3071	3.5
				Émergence Combes Feuillantines					1.1	12.1	1690	6.4
				Émergence du Crol Bas					0.4	17.9	3800	6.6
				Émergence du Gua					0.2	15.2	2973	6.1
				Émergence du Moulin					4.4	14.7	2677	6.2
				La Bouyssonie 2					2.3	20.3	2226	9.4
			Cransac	Émergence Augustin				4	1.2	24.6	7075	6.7
0.1					13.4	1550			7.4			
6.6					22.9	3416			7.1			
Decazeville			Émergence du Mas de Mouly	1	0.8	15.1		1101	6.4			
					0.3	13.7		2702	7.5			
					13.7	13.7		2702	7.5			
Hérault (34)	Bassin houiller de l'Hérault	Bousquet-d'Orb	TB 250	4	1	70	16.7	1577	7			
			Puits Debay			17	17.7	1761	7.2			
			TB de Grand Champ			70	15.4	1000	6.9			
			Frangouille			11.3	14.7	1266	7			
Ariège (08)	District polymétallique des Pyrénées Ariégeoises	Coufflens	Émergence de Salau	1	1	-	-	-	-			
Aude (11)	District aurifère de Salsigne	Lastouts	Émergence de la Caunette	1	1	5.73	15.64	1166.37	7.81			
Auvergne-Rhône-Alpes	Isère (38)	Bassin houiller du Dauphiné	Motte-d'Aveillans	26	13	5	35.4	13.8	864.4	7		
							Galerie de la Faurie	75.8	12.7	1360	6.8	
							Galerie N4 Bis	0.2	7.3	970	7.6	
							Galerie N10 Bis	1.1	11.1	633	7	
							Galerie N14	8.1	13.8	1957	6.8	
			Motte-Saint-Martin			Galerie N3 sous La Molière	2	-	-	-	-	
								8	13	2621	6.8	
			Prunières			Galerie Badier 1	2	0.4	10.5	1780	4.4	
								4.9	12.1	1437	7.4	
			Saint-Arey			Galerie de Combe Neveuse	2	53.1	10.9	899	7.2	
	-	17.2			2399			7.3				
	Susville	Galerie du Peychagnard N10	2		7.4	10.6	1302	7.52				
					2.8	10.4	976	6.9				
	Loire (42)	Bassin houiller de la Loire	Firminy		Bas Mas	8	1	102.8	16.3	1575	7.1	
					Ricamarie			45	18	2031	6.5	
					Roche-la-Molière			65.8	18.2	2705	6.8	
					Roare			15	14.7	1580	6.8	
					Saint-Étienne			28.3	15.3	1673	6.8	
Saint-Genest-Lerpt				9.8	19.9			2945	7.3			
Cluzel Haut				9.9	16.2			1730	7.9			
Villars				46.7	19.2			2397	7.2			
Puy-de-Dôme (63)	Bassin houiller de Messeix	Messeix	Les Mouillères	2	1	100	16.2	640.3	6.7			
Allier (03)	Bassin houiller de l'Aumance	Buxières-les-Mines	Les Gauthrins	1	1	16.6	13.1	2848.1	6.2			
			Chesny-les-Mines			10	-	-	3			
Rhône (69)	Entrée station Chesny	Fourneaux	Côte-en-Velin	1	1	-	-	-	-			
Savoie (73)	Bassin houiller de Savoie	Fourneaux	Côte-en-Velin	1	1	-	-	-	-			
Normandie	Calvados (14)	Mine de May-sur-Orne (fer)	May-sur-Orne	9	8	1	-	-	-	-		
			Saint-André-sur-Orne				-	-	-	-		
			Gouvix				360	-	-	-		
			Saint-Germain-le-Vasson				120	-	-	-		
		Mine de Soumont (fer)	Soumont-Saint-Quentin			1	0	-	-	-		
							25	-	-	-		
		Mine de Jurques (fer)	Site de Mont-Pinçon (fer)			1	10	-	-	-		
							10	-	-	-		
Mine de Saint-Rémy (fer)	Saint-Rémy-sur-Orne	1	-	-	-	-						
			-	-	-	-						
Orne (61)	Mine de la Ferrière aux Étangs (fer)	La Ferrière-aux-Étangs	Exutoire TB 220	1	1	-	-	-	-			
Grand-Est	Moselle (57)	Bassin ferrifère Lorrain	Fontoy	5	3	1	-	-	-	-		
			Moyeuvre-Grande				-	-	-	-		
	Meurthe-et-Moselle (54)	Bassin ferrifère Lorrain	Avril		2	1	720	-	-	-		
			Mancieulles				-	-	-	-		
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône (13)	Bassin houiller de Provence	Fuveau	5	5	1	-	14.2	790.5	7.2		
			Marseille				930	20.8	3600	6.7		
			Peypin				-	14.5	1045	7.2		
			Trets				-	14.5	1001	6.8		
			La Bouilladisse				-	-	-	-		
Bourgogne-Franche-Comté	Saône-et-Loire (71)	Bassin de Blanzly-Montceau	Blanzly	2	2	1	0.2	12	650	7		
			Perrecy-les-Forges				-	-	-	-		

Figure 24 : Synthèse des émergences minières.

### 3.2.2. Estimation de la puissance extractible (MW) par émergence selon leurs caractéristiques débit/température

Sur la base des valeurs moyennes annuelles des débits et des températures disponibles, qui correspondent aux mesures ponctuelles réalisées lors des visites par les agents du BRGM/DPSM, **les potentiels de valorisation peuvent être estimés en considérant les couples débit / température de chaque émergence** et en prenant l'hypothèse d'un delta de température de 5 °C prélevée sur la ressource.

Compte tenu de son débit extrêmement élevé (930 m<sup>3</sup>/h), et avec une température moyenne de 20,8 °C, l'émergence de la galerie de la Mer (bassin houiller de Provence) représente le potentiel géothermique le plus élevé : 5,4 MW.

En considérant des couples débit / température intermédiaires (supérieurs à 50 m<sup>3</sup>/h et 15 °C), sept émergences présentent des potentiels compris entre 300 et 500 kW :

- 574 kW pour l'émergence des Esteyraings (99 m<sup>3</sup>/h – 20,8 °C) localisée sur la commune de Martinet (30) ;
- 447 kW pour l'émergence de la galerie Mas Blanc (77 m<sup>3</sup>/h – 15,9 °C) localisée sur la commune de La Grand-Combe (30) ;
- 422 kW pour l'émergence de la galerie Verrerie (72,7 m<sup>3</sup>/h – 21,3 °C) située sur la commune de La Grand-Combe (30) ;
- 406 kW pour deux émergences localisées dans le département de l'Hérault (34) correspondant à la galerie du TB 250 (70 m<sup>3</sup>/h – 16,7 °C) située sur la commune du Bousquet-d'Orb et la galerie du TB Grand Champ (70 m<sup>3</sup>/h – 15,4 °C) située sur la commune de Graissessac ;
- 382 kW pour l'émergence Rieux (65,8 m<sup>3</sup>/h – 18,2 °C) localisée sur la commune de Rochela-Molière (42) ;
- 313 kW pour l'émergence de la galerie Burat (53,9 m<sup>3</sup>/h – 16,5 °C) située sur la commune de Vernarède (30).

Pour les couples débit / température inférieurs (supérieurs à 15 m<sup>3</sup>/h et 15°C), les potentiels thermiques varient de 100 à 300 kW :

- 266 kW pour la galerie Chalmeton (45,9 m<sup>3</sup>/h – 15,6°C) située sur la commune de Molières-sur-Cèze (30) et la galerie Villars (46,7 m<sup>3</sup>/h – 19,2°C) située à Villars (42) ;
- 261 kW pour les galeries Saint-Illyde et Saint-François (45 m<sup>3</sup>/h – 18°C) localisées sur la commune de Bessèges (30) et la galerie Fendue Lyon (45 m<sup>3</sup>/h – 18°C) à Ricamarie (42) ;
- 122 kW pour la galerie Cornas (21 m<sup>3</sup>/h – 17,3°C) à Chambon (30).

### 3.2.3. Le potentiel de valorisation géothermique des émergences minières selon une approche territoriale par bassins miniers

La densité des émergences minières sur un territoire donné, associé à un bassin minier particulier, confère à ce territoire un potentiel de valorisation géothermique *a priori* plus important, si l'on considère la probabilité plus grande qu'une émergence puisse être localisée à une distance suffisante d'un utilisateur pour être exploitée.

D'autre part, la présence de plusieurs émergences sur un territoire donne des informations (température et minéralisation notamment) plus complètes sur les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir minier et son accessibilité directe (par l'intermédiaire des ouvrages existants) ou indirecte (par le biais de nouveaux ouvrages à réaliser, forages par exemple).

La répartition géographique des 83 émergences minières (associées à 22 bassins miniers distincts) fait apparaître les éléments suivants :

- 6 régions, 17 départements et 53 communes sont concernés par la présence d'au moins une émergence minière sur leur territoire ;
- les régions Occitanie (36 émergences recensées) et Auvergne-Rhône-Alpes (26) se détachent très nettement au niveau national, par rapport à 5 autres régions : Normandie (9), Grand-Est (6), Provence-Alpes-Côte d'Azur (5), Bourgogne-Franche-Comté (2) ;
- au sein de la région Occitanie, les départements du Gard (centré la commune d'Alès) et de l'Aveyron (centré la commune de Decazeville) comptent le plus grand nombre d'émergences, respectivement 19 et 11 ;
- au sein de la région Auvergne-Rhône-Alpes, les départements de l'Isère (bassin houiller du Dauphiné) et de la Loire (centré sur la commune de Saint-Étienne) comptent respectivement 13 et 8 émergences minières.

L'ensemble des territoires concerné par la présence d'une émergence minière peut présenter un intérêt pour la valorisation géothermique d'une ressource potentielle plus ou moins importante, comme le montre les volumes d'eau estimés dans les réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain (450 millions de m<sup>3</sup> sur 11 réservoirs distincts) ou du bassin ferrifère en Normandie (5 millions de m<sup>3</sup> dans les anciennes mines de May-sur-Orne dans le Calvados).

### 3.3. RECENSEMENT ET CARACTÉRISATIONS DES PUIXS DE MINE

L'évaluation du potentiel de valorisation des puits de mine reste très largement incomplète au stade de cette étude. En effet, **tous les puits de mine réalisés en France ne font pas l'objet d'une surveillance par le BRGM/DPSM, celle-ci se limitant aux ouvrages permettant de répondre aux besoins et aux objectifs de la surveillance actuelle d'un certain nombre d'anciens sites miniers déterminé.**

Les informations disponibles dans le cadre de la surveillance réalisée au titre de l'après-mine par le BRGM/DPSM, ont néanmoins permis de **localiser 536 puits sur le territoire national** et de relever un certain nombre d'éléments relatifs à la valorisation géothermique potentielle d'anciens sites miniers par l'intermédiaire des puits de mine.

La très grande majorité de ces puits (84 %) est située dans le **bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais**.

**Dans la région des Hauts-de-France**, on comptabilise ainsi 459 puits de mine, dont 254 dans le département du Nord, et 205, dans le département du Pas-de-Calais. L'exploitation potentielle des eaux de ce bassin houiller est très fortement contrainte par la production résiduelle du gaz de houille qui accompagne l'ennoyage du bassin toujours en cours et loin d'être terminé. La surveillance exercée par l'État et la mission du BRGM/DPSM, ainsi que les permis d'exploitation et de recherche des sociétés exploitant le gaz, limitent fortement l'accès à la ressource géothermale potentielle. À l'échéance 2020-2030, la ressource pourrait potentiellement être valorisée au niveau de quelques communes (7) situées à l'est du département du Nord, au nord de Valenciennes. Selon les secteurs considérés, la température du fluide serait de l'ordre de 20 à 30 °C, à une profondeur de 550 à 1 050 mètres.

**Dans la région Grand Est**, un volume d'eau de plus de 450 millions de m<sup>3</sup> a été évalué dans les 11 réservoirs miniers du **bassin ferrifère lorrain** (Vaute, 2017). Parmi les 34 points d'accès identifiés, 16 puits ont été dénombrés. Le puits Amermont III correspond à l'ouvrage le plus profond (287 mètres) et à la température la plus élevée (16,6 °C). **Dans le bassin houiller lorrain**, 14 puits situés dans le département de la Moselle (57) ont été caractérisés en détail (accessibilité, usage actuel, fermeture ou non en surface, profondeur atteinte, profondeur des galeries entrecoupées, état d'ennoyage), dans le cadre d'une étude antérieure portant sur le potentiel de valorisation géothermique (Cartannaz *et al.*, 2008).

**Dans la région Occitanie**, la production d'eau minière permanente, au niveau du puits Fontanes (commune de Saint-Martin-de-Valgalgues), à un débit moyen de 220 m<sup>3</sup>/h et une température de 23,4 °C, permettrait d'atteindre une puissance thermique de 1,3 MW accessible *via* une pompe à chaleur prélevant 5 °C sur la ressource.

**Dans le bassin houiller de Provence**, une opération pilote a été lancée en 2018 pour la valorisation géothermique de l'ancienne mine de Gardanne (13). Le puits Yvon Morandat (10 mètres de diamètre, 800 mètres de hauteur ennoyée) et la température des eaux minières de 28 °C permettent de valoriser ce réservoir de 60 000 m<sup>3</sup> d'eau pour une production évaluée initialement à 1,3 GWh par saison (hiver/été).

### 3.4. CONCLUSIONS

L'inventaire des émergences minières présenté dans le cadre de ce rapport peut permettre de susciter l'intérêt d'un utilisateur potentiel pour valoriser localement cette ressource énergétique.

Dans chaque cas, une étude de faisabilité technico-économique serait à réaliser pour valider la pertinence de cette opportunité vis-à-vis des besoins thermiques à couvrir et des contraintes d'utilisation des eaux minières. Cette étude devra nécessairement intégrer des mesures de débit et de température pour vérifier l'évolution annuelle de ces paramètres, les valeurs utilisées dans le cadre de ce rapport n'étant que des données ponctuelles.

Suivant une approche territoriale, le potentiel de valorisation géothermique des anciens sites miniers pourrait être étudié à l'échelle des bassins miniers, en intégrant l'ensemble des données (émergences, puits de mine, ouvrages de contrôle profond et points de contrôle en surface) disponibles pour caractériser le ou les réservoir(s) minier(s) cible(s) et définir les conditions optimales pour la réalisation d'un nouveau projet.

Les potentialités démontrées dans le cadre d'études antérieures (bassins houillers de Provence, de Lorraine et du Nord-Pas-de-Calais et bassin ferrifère lorrain notamment) pourraient être complétées afin de relancer ou susciter de nouveaux projets.

## 4. Conclusions et perspectives

Cette étude complémentaire aux deux études précédentes PETROVAL et VALGEOMIN apporte des éléments techniques et chiffrés sur les possibilités de reconversion des forages d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures, ainsi que sur le potentiel de valorisation des émergences minières ou de puits de mine.

Les forages d'hydrocarbures sont effectivement très nombreux et peuvent, sous certaines conditions, être réutilisés :

- soit en boucle ouverte, avec pompage du fluide dans la même formation que celle exploitée par les pétroliers, mais sous-jacentes au niveau d'huile et ayant présenté des indices aquifères (exemple des grès du Chaunoy du Trias), ou dans d'autres formations aquifères sus-jacentes, comme les calcaires du Bathonien du Dogger, en venant faire des perforations ou fraisage dans le tubage ;
- soit en boucle fermée en équipant l'ouvrage d'un échangeur coaxial et faisant circuler un fluide caloporteur dans la partie annulaire et le tubage interne isolé thermiquement.

Ces différentes technologies de reconversion sont encore peu utilisées à ce jour (cf. retours d'expérience en France et à l'étranger de l'étude PETROVAL) et mériteraient d'être étudiées dans les années à venir, en tenant compte, par ailleurs, de la fin annoncée de l'exploitation des hydrocarbures en France.

Les forages présentant un potentiel à la reconversion sont ceux disposant d'un diamètre de tubage à minima de 7" car, pour les diamètres inférieurs, la reconversion devient moins intéressante, voire impossible techniquement à réaliser. Le bon état des tubages et des cimentations est un point important de la reconversion, notamment l'étanchéité horizontale et verticale par rapport aux formations géologiques aquifères traversées ; cela est d'autant plus vrai pour la reconversion en boucle ouverte où le tubage 7" servira de tubage de production ou de réinjection.

Un diagnostic des forages qui prendrait mieux en compte l'historique et l'intégrité du forage connus de l'opérateur permettrait de ne pas forcément systématiser toutes les diagraphies de contrôle pouvant représenter un poste coûteux dans la reconversion et de mieux cibler les ouvrages les plus pertinents pour une reconversion.

Les émergences minières sont également intéressantes en termes de débits (jusqu'à plus de 100 m<sup>3</sup>/h, avec même plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h pour certaines émergences), avec toutefois des températures plus faibles (entre 10 et 25°C, en général). Ainsi, avec un delta de température de 5°C les puissances extractibles peuvent être de quelques centaines de kW.

En prenant en compte les contraintes liées aux objectifs de la surveillance des anciens sites miniers (assurer le drainage du réservoir minier) et à la sécurité des personnes (risque d'émanations de gaz : CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S et CO<sub>2</sub> notamment), chaque émergence minière représente un potentiel de valorisation géothermique, avec comme principal avantage, de bénéficier de la production en surface d'eau minière, sans avoir l'obligation de réinjecter le fluide dans le réservoir minier, et comme inconvénients majeurs, la capacité de l'émergence à conserver un débit constant et la qualité chimique du fluide minier (phénomènes d'encrassement et de corrosion potentiels des équipements).

En complément des émergences, les pompages effectués sur certains puits miniers sont également des sources de chaleur valorisables et encore peu exploitées à ce jour.

Les contraintes de reconversion (que ce soit pour les forages d'hydrocarbures ou les émergences minières ou puits de mine) sont liées également à la localisation des ouvrages par rapport aux utilisateurs potentiels et les besoins énergétiques identifiés.

Les perspectives du projet seraient, maintenant, la réalisation de pilote(s) (exemple de la reconversion du puits minier de Gardanne) pour démontrer la faisabilité technico-économique des différentes technologies envisageables.

## 5. Références bibliographiques

- Bonté, D., Laurent, G.F., Garibaldi, C., Bourguine, B., Opez, S., Bouchot, V., Lucazeau, F., 2010. Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: New data compilation and interpolation. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 181, 377–390.
- Bouchot, V., Bader, A.-G., Bialkowski, A., Bonté, D., Bourguine, B., Caritg, S., Castillo, C., Dezayes, C., Gabalda, S., Guillou-Frottier, L., Haffen, S., Hamm, V., Kervévan, C., Lopez, S., Peter-Borie, M., Beccaletto, L., Blaisonneau, A., Bourquin, S., Capar, L., Carré, C., Castagnac, C., Colnot, A., Le Guenan, T., Lerouge, C., Rigollet, C., Thiéry, D., 2012. CLASTIQ-2 : projet de recherche sur les ressources géothermales des réservoirs clastiques en France (bassin de Paris et fossé rhénan), Rapport final BRGM/RP-61472-FR.
- Bugarel, F., 2020. avec la collaboration de Corneveaux A. – Projet VALOR. Potentiel de valorisation géothermique des ouvrages miniers. 190 p., 86 fig., 55 tabl., 2 ann. Rapport BRGM/RP-69735-FR.
- Cartannaz, C., Fourniguet, G., 2008. Projet MINEWATER descriptif technique des puits (profondeur supérieure à 800 m) du Bassin Houiller lorrain appliqué à la préfaisabilité géothermique. 67 p., 29 fig., 3 annexes. Rapport final BRGM/RP-56096-FR.
- Hamm, V., Arnaud, L., 2017. Etude des opportunités de valorisation énergétique du potentiel géothermique en France métropolitaine – Cas de l’Albien et du Dogger. 78 p., 26 fig., 3 ann., Rapport final. BRGM/RP-67262-FR.
- Hamm, V., Bugarel, F., 2018. Projet VALGEOMIN Potentiel de VALorisation GÉOthermique des anciens sites MINiers. État des lieux en Europe et en France. 142 p., 69 fig., 20 tabl., Rapport final BRGM/RP-67529-FR.
- Lahaie, F., 2015. Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l’exploitation des puits d’hydrocarbures.
- Maurel, C., Hamm, V., Bugarel, F., Maragna, C., 2019. avec la collaboration de Badinier G. - Projet PETROVAL. Potentiel de valorisation géothermique des forages d’exploration et d’exploitation d’hydrocarbures au niveau national. 127 p., 65 fig., 17 tabl. Rapport final BRGM/RP-68593-FR.
- Vaute, L., 2017. avec la collaboration de G. Fourniguet, E. Giugliaris, C. Laredo, G. Demangean – Etude du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain. 47 p., 14 ill., 5 ann. Rapport final BRGM/RP-67079-FR.



**Centre scientifique et technique**  
**Direction des Géoressources**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)