



HAL
open science

Vers une gestion patrimoniale des forages utilisés dans le contexte de l'après-mine en France métropolitaine

Frédéric Bugarel

► To cite this version:

Frédéric Bugarel. Vers une gestion patrimoniale des forages utilisés dans le contexte de l'après-mine en France métropolitaine. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719881

HAL Id: hal-03719881

<https://hal.science/hal-03719881v1>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VERS UNE GESTION PATRIMONIALE DES FORAGES UTILISES DANS LE CONTEXTE DE L'APRES-MINE EN FRANCE

TOWARDS A PATRIMONIAL MANAGEMENT OF BOREHOLES USED IN THE CONTEXT OF THE POST-MINING ERA IN FRANCE

Frédéric BUGAREL, *BRGM/DPSM*, Orléans, France

RESUME –

Dans le cadre opérationnel de l'après mine en France, le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM gère près de 1000 forages. Le développement des opérations de diagnostic, pour connaître leur état actuel et anticiper les coûts des travaux à venir, représente un enjeu économique très important. Une logique de gestion patrimoniale est progressivement mise en place et intègre la réalisation de nouveaux forages.

ABSTRACT –

Within the operational framework of the post-mining era in France, BRGM's Department of Mining Prevention and Safety (DPSM) manages nearly 1,000 boreholes. The development of diagnostic operations, to identify their current state and anticipate the costs of future works, represents a very important economic challenge. An asset management approach is gradually being implemented and includes the construction of new boreholes.

1. Introduction

Dans le cadre opérationnel de l'après mine en France métropolitaine, le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM assure, depuis sa création en 2006 et pour le compte de l'Etat, la surveillance des risques associés aux anciens sites miniers et leur mise en sécurité. Cette mission comprend notamment la gestion et la réalisation de forages de natures diverses dans des contextes variés, souvent complexes.

Au sein du DPSM, les Unités Territoriales Après-Mine (UTAM) mènent localement, en étroite relation avec les DREAL (donneurs d'ordres), des activités de surveillance et de mise en sécurité des sites et/ou ouvrages miniers selon une répartition géographique correspondant à la localisation des anciennes exploitations minières, par exemple l'UTAM Nord basée à Billy-Montigny (62) gère les équipements liés à la surveillance du bassin houiller des départements du Nord et du Pas-de-Calais.

2. Le patrimoine géré par le DPSM et l'ingénierie des projets de forage

2.1. Etat de connaissance du patrimoine forages et ses enjeux

Le DPSM gère près de 1000 forages sur l'ensemble du territoire national au titre de l'après-mine. La moitié de ces ouvrages est localisée dans l'Est de la France où se trouvent notamment d'anciennes exploitations minières de houille, de fer, de sel et de pétrole, un quart se trouve dans le Nord, le reste se trouvant réparti dans le Sud et le Centre-Ouest qui comptent une centaine de forages pour chacune de ces deux zones géographiques (cf. Figure 1). Ces forages sont utilisés comme des équipements de surveillance et sont intégrés selon différentes typologies d'ouvrages (ouvrage de contrôle profond, ouvrage de pompage d'eau souterraine, sondage de décompression de gaz...) dans les bases de données qui ont été créées pour répondre aux besoins des activités de surveillance. Une base de données spécifiques aux forages est en cours de réalisation.

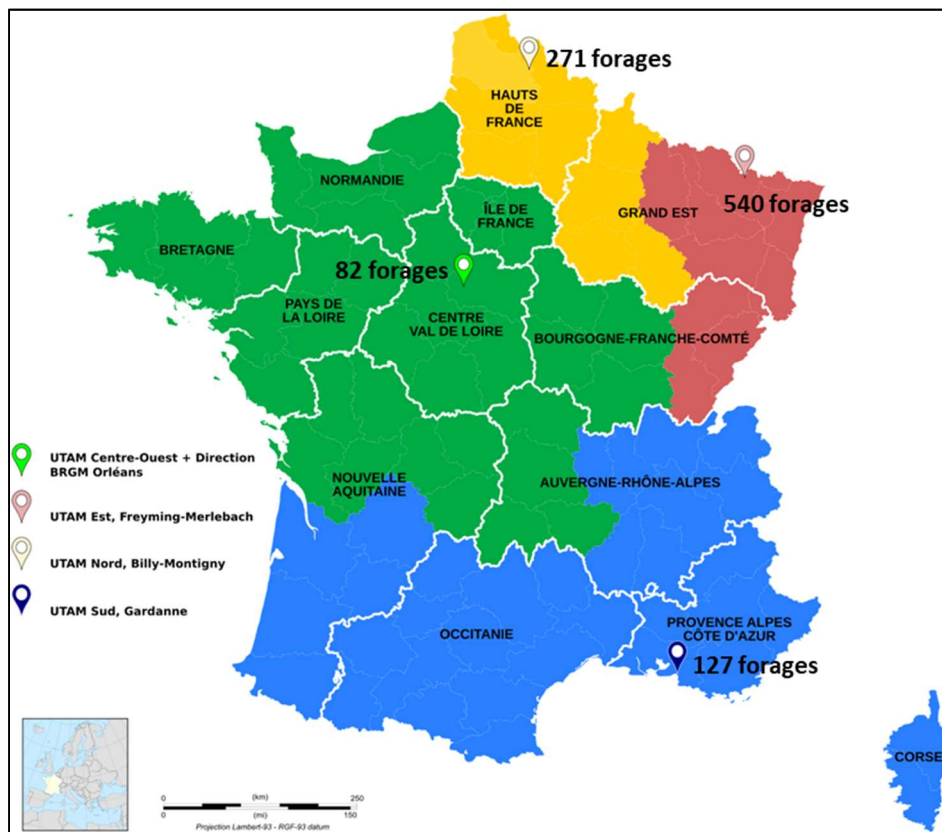


Figure 1. Répartition géographique des 1020 forages gérés par le DPSM

Leurs architectures ont été conçues afin d'assurer des fonctions différentes (forages de rabattement de nappe ou de décharge hydraulique de réservoirs miniers, piézomètres, sondages de décompression de gaz de mine, de contrôle de cavités souterraines ou de suivis microsismiques, ...) et d'atteindre les formations géologiques cibles à des profondeurs de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres selon les sites miniers considérés. Le forage le plus profond atteint près de 800 mètres dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais.

La grande majorité de ces forages a été réalisée par les anciens exploitants miniers, et pour la plus grande partie par Charbonnages de France. Les données techniques disponibles étant souvent lacunaires, le diagnostic par diagraphie de ces ouvrages est indispensable pour d'une part vérifier la coupe technique des forages, et d'autre part connaître leur état actuel afin de contrôler leur intégrité et évaluer leur vieillissement. Le coût de ces opérations de diagnostic varie entre 5 et 15 k€ HT par forage, ce qui multiplié par le nombre total de forages gérés par le DPSM, représente plusieurs millions d'euros à budgétiser dans les prochaines années, afin de qualifier l'état de ce patrimoine et de pouvoir anticiper financièrement le coût des travaux à venir.

Dans la démarche initiée depuis quelques années, les actions menées par le DPSM sont orientées en priorité vers les forages qui présentent des anomalies de fonctionnement révélées lors des activités de surveillance (e.g. pression anormale du réservoir cible, débit d'exhaure instable, blocage des sondes de mesure...). Le cas notamment d'un forage relativement récent (une vingtaine d'années) présentant un état extrêmement dégradé (forage ciblant une ancienne galerie minière à environ 80 mètres de profondeur, obstrué à 15 mètres et totalement déstructuré dans sa partie sommitale) démontre la nécessité d'un suivi régulier de l'état de ces ouvrages confrontés à des phénomènes de corrosion très importants liés à la nature des fluides circulant dans les réservoirs miniers. Cette logique d'intervention curative atteint rapidement ses limites, en particulier lors des interventions dans les forages rendues complexes par leur état dégradé, remettant en cause leur intégrité,

rendant aléatoire la réussite des opérations de fermeture définitive de ces ouvrages en fin de vie et augmentant très significativement le coût de ces travaux.

Ponctuellement, le DPSM est également amené à traiter des projets de fermeture définitive de forages profonds, tels que des forages anciens (de l'ordre de 100 ans) captant l'aquifère stratégique de l'Albien en région Ile-de-France (projets en cours), ou de forages pétroliers (cas de la mise en sécurité d'un forage situé à Cébazat (63) en 2012) ou géothermiques (cas du forage de la Castillonne situé à Montagnac (34), projet en cours). Bien que cette problématique, qui devrait se multiplier en France dans les prochaines années, soit bien connue depuis de nombreuses années (Galin, 2000) au plan national, les conditions garantissant la pérennité de ces opérations font toujours actuellement l'objet de projets de recherche à l'échelle internationale (Al Ramadan et al., 2019 ; Vralstad et al., 2019).

2.2. L'ingénierie des projets de forage : rôle et responsabilité des acteurs

Selon l'état actualisé des forages, des travaux de nettoyage, de réhabilitation ou de fermeture définitive (voire de reconversion) peuvent être envisagés. Une phase d'étude de faisabilité technico-économique peut alors permettre de comparer différents scénarios afin d'identifier la solution la plus adaptée et d'éventuelle(s) solution(s) de repli en cas d'échec. La phase de conception du projet doit être affinée en phase d'avant-projet afin de préciser le programme de travaux et les moyens à mettre en œuvre pour garantir l'atteinte des objectifs techniques en maîtrisant les risques, les budgets et les délais.

En tant que Maître d'Ouvrage Délégué (MOD), le DPSM établit les cahiers des charges pour la phase de consultation du (ou des) marché(s) de travaux et peut associer la Maîtrise d'œuvre (MOE) dès les phases préliminaires de conception du projet selon les enjeux techniques, environnementaux et économiques du projet.

En fonction des risques opérationnels, les rôles et responsabilités de la Maîtrise d'œuvre et des entreprises de travaux sont engagés selon la nature contractuelle des marchés (forfait ou régie) établis dans le cadre de la commande publique, et dans le respect du cadre réglementaire (arrêté interministériel du 11 septembre 2003 et son guide d'application de septembre 2004) ainsi que des règles de l'art (norme forage NF X10-999 d'août 2014).

Si le projet présente des risques opérationnels faibles, un marché de travaux forfaitaire peut être privilégié afin notamment de maîtriser l'aspect budgétaire. L'entreprise de travaux mobilise les moyens adaptés aux travaux à réaliser et s'engage sur des coûts opérationnels fixés à la signature du contrat, la Maîtrise d'œuvre ayant alors la responsabilité du contrôle de la qualité des travaux. Dans ce cadre contractuel, l'entreprise de travaux a une obligation de résultat(s) qui correspond à l'atteinte des objectifs techniques définis dans le cahier des charges, limité aux caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage à réaliser et/ou aux travaux à effectuer dans l'ouvrage. Cette obligation de résultats ne peut être appliquée aux caractéristiques hydrogéologiques d'un aquifère ou d'un réservoir minier cible qui doivent être associées à l'aléa géologique. Par contre elle peut s'appliquer aux caractéristiques visées de l'ouvrage telles que la qualité de la cimentation des espaces annulaires des tubages garantissant l'intégrité de l'ouvrage vis-à-vis des aquifères traversés (protection de la qualité des ressources en eau), ou à la trajectoire du forage (avec une certaine tolérance) permettant d'accéder à un vide minier (ancienne galerie par exemple). Ceci s'oppose totalement au chapitre « 4.2 Contrat/Marché » de la norme forage (AFNOR, 2014) où la première phrase stipule que « L'entreprise de forage n'a que des obligations de moyens et de conseils. » ce qui, du point de vue d'un Maître d'ouvrage, devrait être rediscuté dans le cadre d'une actualisation de cette norme.

Dans le cas où le projet présente des risques opérationnels (et donc financiers) importants, un marché de travaux en régie devra être privilégié par le MOD afin de tenir compte de l'impossibilité des entreprises de travaux de s'engager sur des coûts forfaitaires acceptables. Dans ce cadre contractuel, l'entreprise est effectivement limitée à une obligation de conseils et de moyens qu'elle aura définie dans son offre en réponse à un

cahier des charges plus détaillé, spécifiant l'ensemble des équipements requis pour la réalisation des travaux qui seront ensuite dirigés par la MOE.

Dans chacune des Unités Territoriales Après-Mine (UTAM), les retours d'expériences en matière d'opérations de forages, internes et externes au DPSM, alimentent les bonnes pratiques relatives à l'ingénierie des projets de forage (analyse des risques, conception, consultation, contractualisation, réalisation) et constituent une donnée d'entrée pour la réalisation de futurs travaux. Cette capitalisation vise à optimiser les moyens de surveillance des anciens sites miniers sur le long terme, dans une logique de gestion patrimoniale des forages.

3. Exemples de problématiques rencontrées dans le cadre des activités de surveillance et de travaux de forage menées par le DPSM

3.1 *Diagnostics de sondages de décompression de gaz dans le bassin houiller du Nord (59) et du Pas-de-Calais (62)*

En termes de gestion de forages, l'UTAM Nord du DPSM a lancé en 2021 une opération pilote de diagnostic de cinq sondages de décompression de gaz dans le cadre de la surveillance du bassin houiller du Nord (59) et du Pas-de-Calais (62). Cette opération vise à contrôler l'état de ces ouvrages méconnus en testant différents types d'instrumentations tout en maîtrisant les risques majeurs liés à la présence de gaz (méthane). La coupe technique ci-dessous (cf. Figure 2) présente l'architecture d'un forage (nommé PP2) utilisé dans le cadre de cette surveillance.

Ce forage de 470 mètres de profondeur est utilisé comme piézomètre pour le suivi de l'envoyage du réservoir minier (houiller) dont le toit a été atteint à 150 mètres de profondeur. Trois tubages (diamètres 18^{5/8}, 13^{3/8} et 9^{5/8}, respectivement 473, 339 et 244 mm) ont permis de couvrir et d'isoler par cimentation (sections hachurées) les formations géologiques superficielles (comprenant l'aquifère de la Craie notamment). Un tubage de diamètre 7^{5/8} (193 mm), dont l'espace annulaire ne paraît pas cimenté, couvre les schistes du Houiller jusqu'à un vide minier (probablement une ancienne galerie) repéré vers 347 mètres de profondeur. Un tubage de diamètre 5^{1/2} (139 mm) crépiné entre 263 et 463 mètres de profondeur a ensuite été mis en place, sans cimentation ni massif filtrant apparents.

Outre la position anormale de la section crépinée entre 263 et 347 mètres (déjà recouverte par le tubage 7^{5/8}), voire l'absence de massif filtrant, le défaut de cimentation du tubage 7^{5/8} et du tubage 5^{1/2} au-dessus de la section crépinée (probablement lié à la présence du vide minier) doit être vérifié dans le cadre d'un diagnostic de l'ouvrage, afin de contrôler son intégrité et d'anticiper les travaux de fermeture définitive du forage qui imposeront de restituer l'étanchéité des formations géologiques identifiées entre les différents niveaux aquifères traversés. Cette incertitude relative à la cimentation des tubages est une problématique qui se retrouve de manière systématique sur l'ensemble des forages hérités des anciens exploitants. Des outils de diaggraphie de type « CBL » (*Cement Bond Log*) sont classiquement utilisés pour révéler la présence de ciment à l'extrados des tubages, mais cette méthode acoustique est limitée si la mesure concerne plusieurs épaisseurs de tubages concentriques et elle ne fonctionne que sous eau (ou puits en boue) et que sur des tubages en acier. De plus, les acquisitions de données ou leurs interprétations peuvent parfois être remises en cause. Des sondes dotées d'une source radioactive peuvent également être utilisées, mais elles sont très peu disponibles sur le marché et elles présentent un risque environnemental très important surtout lorsque l'état du forage est inconnu. Pour des tubages en PVC, des outils de type mécanique (mesurant une résistance à une pression appliquée sur la paroi) pourraient être développés, au moins un opérateur français le propose actuellement suite à un dépôt de brevet.

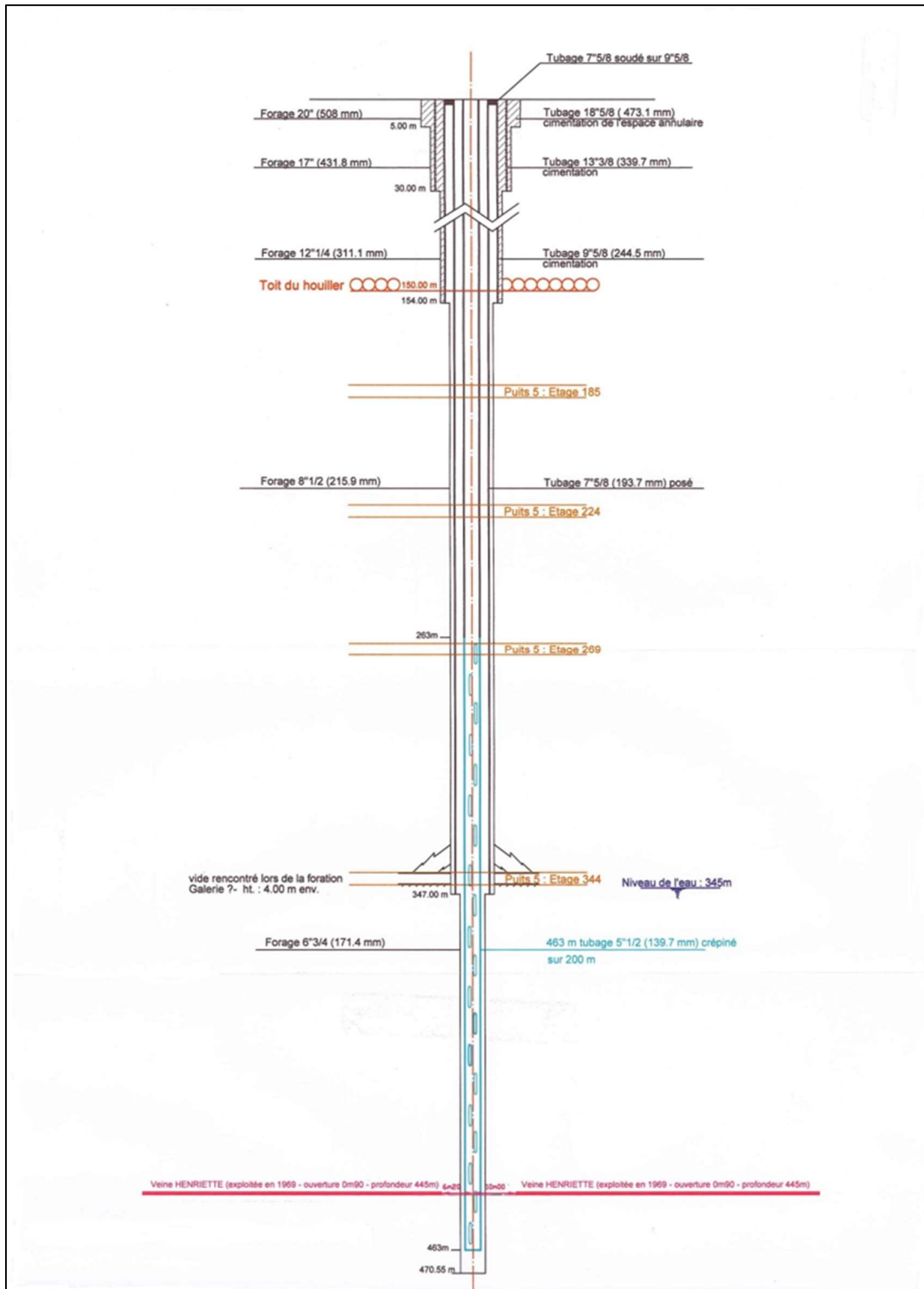


Figure 2. Coupe technique du forage PP2

Pour contrôler l'état des parois internes des tubages et des crépines, les inspections par caméra vidéo sont systématiquement réalisées dans les forages. Ces inspections sont très utiles mais elles sont limitées dès lors que l'eau dans le forage est trouble et elles ne quantifient pas l'évolution des épaisseurs de dépôt et de corrosion. Elles peuvent ainsi être complétées par des diagraphies employant les méthodes d'imagerie acoustique ou mécanique (outil de type diamètreur, utilisable hors section crépinée) qui permettent d'obtenir des mesures comparables entre deux (ou plusieurs) diagnostics afin d'évaluer les vitesses des phénomènes de dépôt / corrosion. Afin d'évaluer l'épaisseur résiduelle d'acier

des tubages (masqué par les dépôts), des outils électromagnétiques sont de plus en plus disponibles sur le marché, avec un coût plus important et une fiabilité qui serait à démontrer. Outre le test de ces instrumentations dans les forages considérés (quels résultats pour quels coûts ?), l'opération pilote lancée par l'UTAM Nord sur cinq sondages de décompression de gaz a pour objectif de maîtriser les risques liés à la présence potentielle de méthane notamment. A défaut de pouvoir mettre en œuvre des outils de diagraphie répondant aux conditions de sécurité liées à la présence d'une atmosphère explosive (ATEX), les entreprises spécialisées françaises n'en disposant pas, le projet comporte une étude préparatoire qui doit identifier les solutions techniques permettant de réaliser les diagraphies en toute sécurité. Plusieurs pistes sont identifiées : travail sous sas étanche connecté à la tête de forage, pompage du gaz en continu, inertage par injection de gaz (argon) ou remplissage d'eau.

Cette opération pilote vise à établir les bases techniques et contractuelles pour généraliser ce type d'intervention sur la centaine de forages gérés par l'UTAM Nord dans ce contexte.

3.2 Travaux de forages de Lochwiller (67)

En termes de réalisation de nouveaux forages, l'UTAM Est du DPSM a récemment réalisé en tant que MOD une opération pilote de rabattement de la nappe du Muschelkalk à Lochwiller (67). Ce dispositif est constitué de quatre forages (un forage de rabattement et trois piézomètres) à proximité immédiate d'une sonde géothermique défectueuse de 140 mètres de profondeur ayant généré de graves désordres sur les infrastructures en surface (voirie et habitations proches notamment).

La photographie ci-dessous (cf. Figure 3) illustre le contexte de réalisation des forages sur une plateforme exigüe, en bordure d'un talus surplombant des habitations proches.

Réalisé en 2009 sur une parcelle privée, le forage de la sonde géothermique a mis en contact l'eau de la nappe captive du Muschelkalk avec le niveau sus-jacent du Keuper contenant de l'anhydrite. Cette communication hydraulique a provoqué le gonflement des terrains superficiels à l'origine des dégâts importants apparus en 2012. Une première tentative de rebouchage de la sonde géothermique, menée par le DPSM en 2015, s'est soldée par un échec lié à la forte déviation de l'ouvrage et à des pertes totales du fluide de forage dans les premiers mètres.

Le dispositif de rabattement, réalisé sur une durée totale d'un an entre juillet 2020 (début des travaux de forage) et juillet 2021 (mise en service), a pour objectif de pomper de manière continue l'eau de l'aquifère du Muschelkalk au plus près de la sonde géothermique afin d'abaisser le niveau de cette nappe artésienne en-dessous du niveau cible du Keuper. En parallèle, le DPSM gère un réseau de surveillance des mouvements en surface.

Compte tenu des incertitudes géologiques liées au défaut d'informations disponibles sur la réalisation de la sonde géothermique défectueuse d'un part, et aux risques associés d'autre part aux opérations de cimentation des tubages notamment (retour d'expérience issu de la tentative de rebouchage de 2015), cette opération a été réalisée dans le cadre de marchés de travaux en régie correspondant à 12 lots distincts, coordonnés et dirigés par le MOE. Cet allotissement, appliqué à des forages relativement peu profonds (de l'ordre d'une centaine de mètres) à l'image des marchés de travaux de forages de type pétrolier contractualisés notamment dans le domaine de la géothermie profonde en France (doublets géothermiques ciblant le réservoir du Dogger entre 1600 et 1800 mètres de profondeur dans le Bassin Parisien), fait l'originalité de cette opération. Il a permis de définir clairement les responsabilités des différentes entreprises intervenant sur le chantier, en particulier pour ce qui concerne les deux entreprises de forage sélectionnées (l'une d'elles étant spécialisée dans le domaine du carottage), ainsi que pour les sociétés attributaires des lots spécifiques de cimentation des tubages, de fourniture du fluide de forage (et des produits associés) et de diagraphies. Dans ce cadre contractuel, les entreprises ont été rémunérées au temps

passé et aux quantités effectivement réalisées, contrôlés et optimisés par le MOE présent en permanence sur site. L'expérience du MOE, associé aux phases de conception et de consultation du projet, a été un élément clé de la réussite de cette opération. L'expérience en ingénierie de forage correspondait à un des critères de sélection prépondérant lors de la consultation pour le marché de Maîtrise d'œuvre.



Figure 3. Travaux de forage à Lochwiller (67) en février 2021

Le premier forage (nommé PMS) carotté jusqu'à 140 mètres de profondeur, puis alésé aux diamètres requis pour la mise en place et la cimentation des tubages, a permis de reconnaître la série géologique jusqu'aux calcaires du Muschelkalk. Des essais hydrogéologiques intermédiaires ont permis de définir les profondeurs des différents aquifères traversés : nappe superficielle au sein des marnes du Keuper et nappe captive intermédiaire au sein de la formation dolomitique de la Lettenkohle. Les tubages ont été mis en place et cimentés de manière adaptée afin d'isoler chacun des aquifères rencontrés.

Sur la base des informations collectées au cours des 42 jours de réalisation de ce premier forage, converti en piézomètre de la nappe profonde du Muschelkalk, les trois autres forages ont été successivement réalisés : un piézomètre (nommé PKA) peu profond (53 mètres) ciblant le niveau du Keuper réalisé sur une durée de 11 jours, le forage de rabattement (nommé FRAB-1) ciblant l'aquifère du Muschelkalk à 120 mètres de profondeur et réalisé en 28 jours, et un piézomètre intermédiaire (nommé PL) ciblant l'aquifère de la Lettenkohle à 75 mètres de profondeur réalisé en 16 jours.

Ce dispositif intègre aujourd'hui le panel des moyens de surveillance géré par le DPSM. Pour cette surveillance particulière du site de Lochwiller, les performances hydrauliques du dispositif de rabattement et l'état des forages seront suivis sur le long terme suivant la logique d'une gestion patrimoniale des forages.

4. Conclusions

Afin d'anticiper la réalisation de travaux de forage à venir (nettoyage, réhabilitation, fermeture définitive, voire reconversion), il est actuellement nécessaire de développer les

diagnostics par diagraphies afin de connaître l'état actualisé des forages gérés par le DPSM dans le cadre de ses missions dédiées à l'après-mine en France métropolitaine.

L'opération pilote de diagnostic de cinq forages lancée en 2021 par l'UTAM Nord dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais doit permettre de définir les conditions de sécurité requises pour maîtriser le risque majeur lié à la présence de gaz (méthane) et démontrer l'efficacité des instrumentations proposées par les entreprises spécialisées. Cette opération pourra être ensuite dupliquée sur la centaine de forages gérés par l'UTAM Nord dans ce secteur géographique et adaptée aux autres secteurs où la problématique liée au gaz n'est pas systématique mais peut localement être rencontrée. Au total, le DPSM gère environ 1000 forages sur l'ensemble du territoire national. L'enjeu économique est par conséquent très important.

Il l'est d'autant plus que le diagnostic fiable et le plus complet possible d'un forage permet de réduire les aléas lors de la réalisation des travaux, dont les enjeux pour le DPSM, en tant que MOD, sont d'atteindre les objectifs techniques des projets tout en maîtrisant les risques, les budgets et les délais opérationnels. Des instrumentations spécifiques (diagraphies électromagnétiques, capteurs de gaz en forage...) pourraient être développées pour répondre à des besoins spécifiques rencontrés notamment dans le domaine de l'après-mine, de même que les pratiques et l'expérience des opérateurs qui n'ont pas l'habitude de travailler dans ces contextes particuliers (présence de gaz et/ou de vides miniers par exemple).

La capitalisation des expériences et les échanges techniques interne et externe au DPSM permettent d'enrichir le savoir-faire et d'adapter l'ingénierie des projets de forage en fonction des risques identifiés. Ceci doit conduire à l'établissement par le Maître d'ouvrage (délégué) de contrats robustes et cohérents, avec la MOE d'une part et les entreprises de travaux d'autre part, qui permettent d'optimiser les chances de succès d'un projet et d'anticiper l'échec en prévoyant la (ou les) solution(s) de repli.

5. Références bibliographiques

AFNOR (2014). Norme NF X10-999 « Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages » du 30 août 2014, 71 p.

Al Ramadan M., Salehi S., Kwatia G., Ezeakacha C., Teodoriu C. (2019). Experimental investigation of well integrity : Annular gas migration in cement column. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 179, pp. 126-135.

Galin R. (2000). Les forages profonds : un autre après-mine ? *Annales de Mines*. pp 41-46.

Ministère de l'écologie et du développement durable et Ministère de la santé et de la famille et des personnes handicapées (2003). Arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié.

Ministère de l'écologie et du développement durable (2004). Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature Eau. Sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain non domestique exécuté en vue de la recherche, de la surveillance ou d'un prélèvement d'eau souterraine septembre 2004. 90 p.

Vralstad T., Saasen A., Fjaer E., Oia T., Ytrehus J.D., Khalifeh M. (2019). Plug & abandonment of offshore wells : Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 173, pp. 478-491.