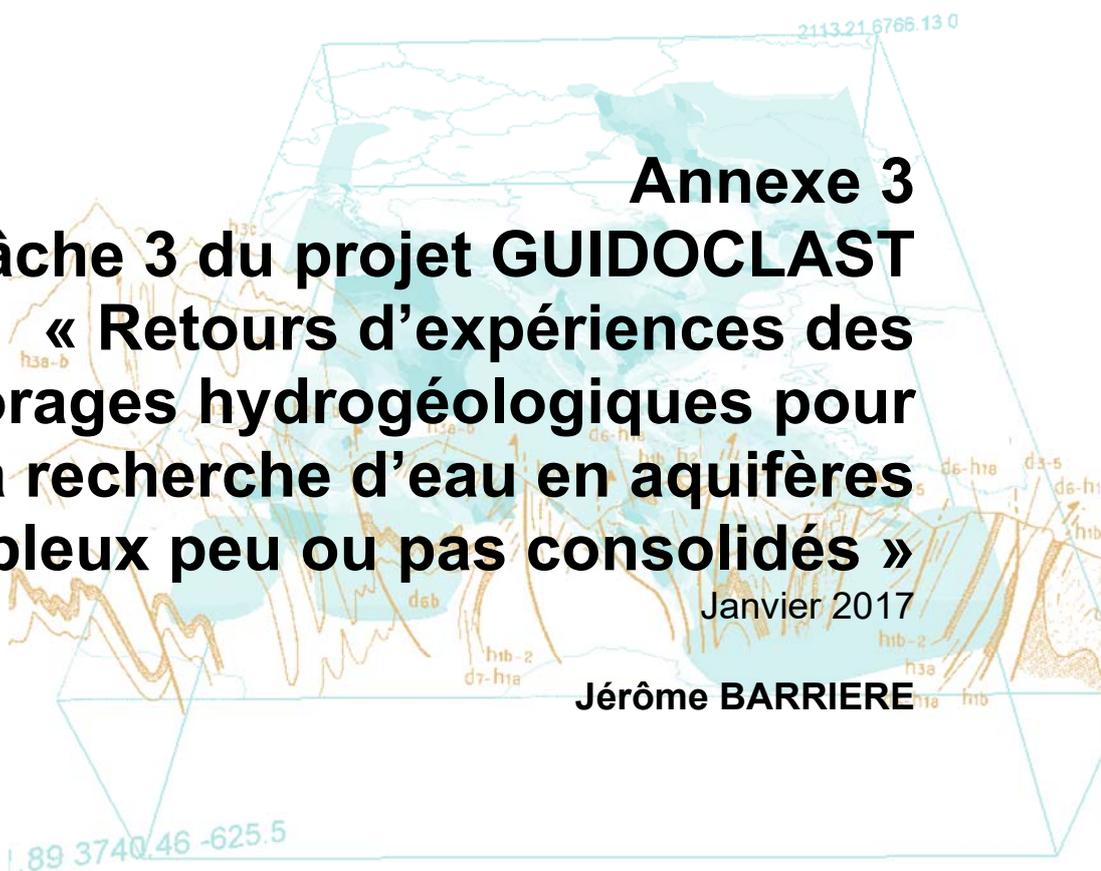




Annexe 3
Tâche 3 du projet GUIDOCLAST
« Retours d'expériences des
forages hydrogéologiques pour
la recherche d'eau en aquifères
sableux peu ou pas consolidés »

Janvier 2017

Jérôme BARRIERE



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Sommaire

1. Présentation du projet GUIDOCLAST et de sa tâche 3, relative aux retours d'expériences des forages hydrogéologiques	7
1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DE REALISATION DU PROJET GUIDOCLAST	7
1.2. DEROULEMENT DE LA TACHE 3 RELATIVE AUX RETOURS D'EXPERIENCES DES FORAGES HYDROGEOLOGIQUES	7
2. Choix de la méthode de reconnaissance des aquifères non consolidés	9
2.1. CADRE REGLEMENTAIRE	9
2.2. CADRE NORMATIF	9
2.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE	10
2.3.1. Forage au battage	10
2.3.2. Forage rotary	10
2.3.3. Forage marteau-fond-de-trou	11
2.3.4. Comparaison des vitesses d'avancement	12
2.4. PRATIQUES OBSERVEES	13
2.4.1. Equipement des entreprises de forages	13
2.4.2. Outils de forage	13
2.4.3. Fluides de forage	14
2.4.4. Pratiques sur des secteurs représentatifs	14
2.4.5. Autres exemples notables	15
3. Modalités d'équipement en ouvrages d'exploitation	17
3.1. CADRE REGLEMENTAIRE	17
3.2. CADRE NORMATIF	18
3.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE	18
3.3.1. Matériaux	18
3.3.2. Crépines	19
3.3.3. Massif filtrant	19
3.3.4. Développement	20
3.4. PRATIQUES OBSERVEES	21
3.4.1. Bassin Parisien et Bassin Aquitain	21
3.4.2. Grès du Trias Inférieur (Buntsandstein)	23
3.4.3. Forage de Plan de Phasy (Guillemestre, 05)	23

4. Modalités de surveillance et maintenance	25
4.1. CADRE REGLEMENTAIRE	25
4.2. CADRE NORMATIF	25
4.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE	25
4.4. PRATIQUES OBSERVEES	26
5. Conclusion : pratiques relatives aux forages hydrogéologiques en aquifères sableux peu ou pas consolidés.....	27
5.1. REALISATION DES FORAGES.....	27
5.2. EQUIPEMENT DES FORAGES.....	27
5.3. SURVEILLANCE, ENTRETIEN.....	28
5.4. BILAN.....	28
6. Bibliographie / Documents consultés.....	29

Annexe 3-A : Coupes techniques de forages hydrogéologiques existants en aquifères non consolidés (extraites de la banque du sous-sol)31 à 42

1. Présentation du projet GUIDOCLAST et de sa tâche 3, relative aux retours d'expériences des forages hydrogéologiques

1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DE REALISATION DU PROJET GUIDOCLAST

Le projet GUIDOCLAST a pour objectif d'établir un guide de bonnes pratiques pour une exploitation optimale et durable de doublets géothermiques Basse Température en réservoirs clastiques. Il s'inscrit dans le cadre des conventions ADEME-BRGM 2016 N° 1605C0010 et 2017 N° 1705C0006.

Il vise à rassurer les opérateurs susceptibles d'explorer puis d'exploiter ces réservoirs alternatifs au Dogger, et éviter les déconvenues et/ou échecs rencontrés lors d'opérations anciennes au Trias notamment (Melleray, Cergy, Achères dans les années 80).

Trois tâches ont été réalisées en 2016 :

- Tâche 1 : Synthèse des retours d'expériences des forages géothermiques réalisés en Europe avec la visite d'opérations au Trias (visites initialement envisagées en Allemagne, Danemark, Suède, Pays-Bas et/ou Royaume Uni).
- Tâche 2 : Synthèse des retours d'expériences des forages géothermiques réalisés en France à l'Albien, au Néocomien, au Trias du centre du bassin de Paris.
- Tâche 3 : Synthèse des retours d'expériences des forages hydrogéologiques pour la recherche d'eau en aquifères sableux peu ou pas consolidés.

Le projet a été finalisé fin de l'année 2017, avec la réalisation de deux tâches complémentaires :

- Tâche 4 : Elaboration d'une stratégie d'exploration adaptée aux réservoirs clastiques, notamment à grande profondeur comme le Trias.
- Tâche 5 : Rédaction du guide de bonnes pratiques en collaboration avec les opérateurs (pour validation)..

Ce document, correspondant à l'annexe 3 du rapport final du projet GUIDOCLAST, présente les résultats du travail réalisé dans le cadre de la tâche 3, relative aux retours d'expériences des forages hydrogéologiques pour la recherche d'eau en aquifères sableux peu ou pas consolidés.

L'objectif de ces retours d'expériences est de déterminer les préconisations acquises dans le domaine des forages d'eau, susceptibles d'être transférées vers l'exploitation de doublet géothermique Basse Température en réservoir clastique peu ou pas consolidé comme c'est le cas de l'Albien-Néocomien du Bassin Parisien.

1.2. DEROULEMENT DE LA TACHE 3 RELATIVE AUX RETOURS D'EXPERIENCES DES FORAGES HYDROGEOLOGIQUES

Cette tâche vise à récolter toute information utile sur l'expérience acquise dans le domaine de l'hydrogéologie, pour le captage des aquifères clastiques non consolidés. Un certain nombre de savoir-faire sont en effet transférables au domaine de la géothermie.

Il s'agissait en priorité de recueillir dans la bibliographie relative aux forages de recherche et d'exploitation d'eau les données relatives :

- aux modalités de reconnaissance de la lithologie et des potentialités hydrauliques des aquifères non consolidés ;
- à l'équipement des ouvrages d'exploitation : choix des matériaux, dimensionnement, pratiques adaptées ;
- à la surveillance : suivi en continu, contrôle du vieillissement ;
- à l'entretien des ouvrages, éventuellement à des dysfonctionnements avérés : inadéquation de l'équipement, vieillissement prématuré, perte de productivité, etc.

Chacun des aspects a été étudié exclusivement dans le domaine des forages d'eau, principalement pour l'alimentation en eau potable et les eaux minérales naturelles (embouteillage, thermalisme), car ce sont les usages pour lesquels on dispose des données les plus complètes. Les quatre angles suivants ont été abordés :

- **Cadre réglementaire** : dans ce domaine, les principaux textes français opposables fixant les restrictions pour les forages d'eau sont :
 - l'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,
 - son guide d'application (Ministère de l'Ecologie et du développement Durable, 2004),
 - le Fascicule n°76 du cahier des clauses techniques générales des marchés publics de travaux, relatif aux travaux de forage pour la recherche et l'exploitation d'eau potable (Ministère de l'Équipement, du Logement de l'Aménagement du Territoire et des Transports, 1987) ; ce document ne concerne que les ouvrages réalisés dans le cadre des marchés publics ;
- **Cadre normatif** : norme AFNOR NF X-10-999 – Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages (2014) ;
- **Préconisations de la bibliographie** : recommandations des ouvrages de référence utilisés en routine dans le domaine du forage hydrogéologique ; ces documents fournissent une base de travail intéressante, car ils résultent eux-même du retour d'expérience de leurs auteurs ;
- **Pratiques observées** : i) données pratiques issues de la Banque du Sous-Sol : coupes techniques des ouvrages, descriptifs de chantier, et ii) données issues de rapports de forages, ou de rapports généraux de synthèse.

Le recensement des pratiques s'est focalisé sur quelques secteurs appliqués aux formations non consolidées « en domaine profond » (plusieurs centaines de mètres) afin d'être transférables vers de la géothermie BT. C'est principalement le cas sur certains aquifères du Bassin Parisien (Albien, Néocomien, Cénomaniens) et du Bassin Aquitain (Eocène, sables inframolassiques), mais aussi sur d'autres secteurs sédimentaires plus restreints, comme les Molasses du Bas-Dauphiné. Enfin, quelques exemples isolés sont également abordés, du fait de leur caractère instructif.

2. Choix de la méthode de reconnaissance des aquifères non consolidés

2.1. CADRE REGLEMENTAIRE

Les différents textes réglementaires français relatifs aux forages hydrogéologiques n'imposent pas de méthode de forage en fonction des terrains traversés :

- le guide d'application de l'arrêté du 11 septembre 2003 indique que "l'entreprise de forage est chargée de mettre en œuvre les techniques de forage adaptées aux conditions de terrains rencontrés."
- le CCTG – Fascicule n°76 précise qu'il appartient "à l'entrepreneur d'attirer l'attention du maître d'ouvrage sur les risques d'utiliser tel ou tel fluide pour la bonne tenue de l'ouvrage et de lui faire prendre l'engagement écrit de le dédommager des conséquences qui pourraient en découler". Dans le cadre des marchés publics de forage d'eau , l'entrepreneur a par conséquent une forte responsabilité sur le choix des fluides de forage.

Globalement, la réglementation s'en remet au savoir-faire des entreprises de forage pour le choix de la méthode appropriée.

2.2. CADRE NORMATIF

La norme NF X10-999 fixe uniquement les grandes lignes directrices, elle préconise une adaptation de la méthode de forage à la nature des terrains :

- le marteau fond-de-trou est à proscrire dans le cas de terrains non consolidés ou plastiques ;
- le rotary et le marteau fond de trou avec tubage à l'avancement sont recommandés pour les terrains peu consolidés / non cohérents ;
- pour le havage ou battage, la traversée de terrains instables nécessite la mise en place de tubes de soutènement.

La norme fixe les spécificités générales relatives aux propriétés rhéologiques de la boue, ainsi que les vitesses ascensionnelles des fluides, mais sans contrainte spécifique aux formations non consolidées. Il est également préconisé :

- de limiter le colmatage des parois du forage, pour éviter l'utilisation ultérieure de produits chimiques pour la phase de développement,
- de procéder à une désinfection de l'ouvrage en fin de travaux car l'utilisation des boues de forage peut accroître le développement bactérien.

2.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE

2.3.1. Forage au battage

C'est la technique de forage la plus ancienne, qui a permis, au cours des siècles passés, de réaliser des forages de plusieurs centaines de mètres de profondeur.

L'enlèvement des déblais se fait à l'avancement par descente d'une soupape. La technique est adaptée aux terrains meubles à condition de descendre des tubes de soutènement à l'avancement. La mise en œuvre est peu coûteuse en énergie, elle ne demande pas de fluide de forage.

Certains forages exploratoires, dans le courant du XIXe siècle par exemple, ont été réalisés au battage sur plusieurs centaines de mètres, dans des terrains non consolidés. Les travaux s'étaient alors sur plusieurs mois voire années : 7 ans pour la réalisation du forage de Grenelle à Albi à Paris (548 m de profondeur). L'isolation progressive des terrains par des tubes de soutènement télescopés permettait une caractérisation des fluides rencontrés à l'avancement.

Mais les vitesses d'avancement liées à la technique sont faibles, ce qui la rend maintenant inadaptée aux forages profonds de plusieurs centaines de mètres. Dorénavant, dans le domaine du forage hydrogéologique, le forage au battage est cantonné aux faibles profondeurs, de plusieurs dizaines de mètres, et grands diamètres, essentiellement pour les terrains non consolidés.

2.3.2. Forage rotary

Le forage au rotary à la boue est unanimement présenté dans la bibliographie comme la méthode de forage de référence pour les formations aquifères non consolidées en profondeur. La boue est en effet le seul fluide susceptible d'assurer le maintien des parois, et le cas échéant de bloquer l'artésianisme.

Les outils préconisés pour cette méthode dans les formations non (ou peu) consolidées sont :

- tricônes acier dent longue (IADC code 1) ou à picots longs (IADC code 4) ;
- outils à lames, qui sont spécifiquement conçus pour le forage des formations non consolidées ; les outils à profils étagés (step type) sont adaptés pour les formations à dominante argileuse.

Il est systématiquement souligné que la foration à la boue nécessite un développement a posteriori dans les règles de l'art, pour évacuer le cake (dépôt colmatant lié au fluide de forage) formé au droit des venues d'eau. Il s'agit de ne pas pénaliser la productivité du forage une fois équipé en ouvrage d'exploitation.

Parmi les types de boue :

- la boue bentonitique est la plus répandue et la plus aisée à mettre en œuvre ; elle forme cependant un cake épais face aux horizons aquifères, ce qui pose parfois des problèmes de dégradation difficilement réversible de leurs propriétés hydrauliques ; il est toutefois important de souligner que c'est grâce à ce cake et aux propriétés rhéologiques de la boue bentonitique que les parois des trous forés dans les terrains non consolidés peuvent être maintenus ouvertes ;

- la boue biodégradable présente l'avantage de réduire le colmatage des réservoirs aquifères à la foration (au détriment d'une moins bonne tenue du trou); cependant, son utilisation en forage d'eau est souvent déconseillée car elle favorise la prolifération des bactéries, voire génère un ensemencement du milieu, entraînant en particulier la propagation de bactéries du fer (Sourisseau et al., 1998) ; celles-ci accélèrent ensuite la corrosion des équipements et la dégradation de la qualité de l'eau;
- les polymères synthétiques sont pour certains également destinés à réduire le colmatage ; dans le domaine de l'hydrogéologie, leur utilisation peut cependant être proscrite pour des problématiques de contamination du réservoir ; ils présentent également des coûts significativement plus élevés, et leur mise en œuvre nécessite un contrôle plus pointu.

L'utilisation d'autres fluides (rotary à l'air ou à l'eau) n'est pas préconisée car elle n'assure pas le maintien des parois dans les formations non consolidées.

L'utilisation de la méthode alternative de circulation inverse autorise la réalisation de forages en grand diamètre, car elle permet de maintenir une circulation ascendante efficace pour l'évacuation des cuttings. Elle est principalement mise en œuvre pour des diamètres supérieurs à 24" (Driscoll et al., 1986), permettant par exemple la mise en place de massifs de gravier conséquents.

2.3.3. Forage marteau-fond-de-trou

Le forage marteau-fond-de-trou en hydrogéologie présente l'avantage d'utiliser l'air comme fluide. Dès la phase de forage, ceci permet d'avoir un aperçu, même s'il est partiel et à considérer avec précaution, des potentialités hydrauliques des formations et de la qualité des eaux souterraines.

Cependant cette méthode est indiquée comme mal adaptée aux terrains non consolidés ou plastiques : le forage s'effectue en parois nues, sans fluide adapté au maintien des parois. Toute formation non consolidée est par conséquent considérée comme « inapte à être pénétrée par cette méthode, sauf en faisant appel à des procédés de consolidation simultanée » (Plote, 1986).

Pour répondre à cette contrainte, la technique du marteau fond-de-trou a été adaptée pour passer les formations meubles, soit en l'accompagnant d'un tubage à l'avancement, soit en utilisant la circulation inverse.

Parmi les techniques de forage au marteau fond-de-trou avec tubage à l'avancement :

- les techniques avec entraînement de tube par le taillant (excentrique type Odex, ou concentrique type Symmetrix), sont principalement citées dans la bibliographie comme adaptées à la traversée des terrains superficiels non consolidés, sur plusieurs dizaines de mètres ; des profondeurs plus importantes peuvent être atteintes, mais dans de petits diamètres incompatibles avec l'équipement en forage d'eau ;
- les techniques avec entraînement du tube par la rotative sont globalement peu abordées ; certains ouvrages généraux donnent des profondeurs maximales limitées pour cette méthode, mais avec de fortes divergences dans les valeurs indiquées ; les documentations de certains constructeurs annoncent des profondeurs maximales jusqu'à 400 m, on retiendra plutôt un maximum compris entre 200 et 300 m pour les techniques utilisées sur le territoire national.

La méthode du marteau fond-de-trou avec circulation inverse développée dans l'industrie minière, utilise des tiges double parois pour entraîner l'air jusqu'à l'outil, puis celui-ci remonte à l'intérieur des tiges avec les déblais de forage. Ce procédé limite considérablement l'érosion des parois du trou par la circulation du fluide et permet de forer des terrains meubles mais non bouillants. En

raison des pertes de charges liées au frottement de l'air dans les tiges de forage, ce procédé impose de pressuriser énormément pour conserver une énergie suffisante pour la percussion de l'outil, ce qui induit rapidement une consommation énergétique lourde.

Plusieurs désavantages du forage à l'air (quelle que soit la méthode) sont listés :

- dans le cas de formations clastiques présentant une fraction argileuse, la plasticité des matériaux génère un risque conséquent de bourrage de l'outil ; ceci impose la réalisation de soufflages très fréquents pour dégager l'outil, et pénalise fortement l'avancement du chantier ;
- dans la colonne en eau, la nécessité de compenser la pression hydrostatique en conservant une énergie suffisante pour l'action du marteau est une limite aux profondeurs d'investigations potentielles ; les capacités matérielles des compresseurs sont déterminantes. La foration d'ouvrages de profondeur supérieure à 300-400 m nécessite l'usage de surpresseurs, rarement mis en œuvre pour les forages d'eau.

2.3.4. Comparaison des vitesses d'avancement

Driscoll et al. (1986) comparent les performances relatives des différentes méthodes de forage d'eau selon les formations géologiques rencontrées, et leur attribuent un indice représentatif de la vitesse de pénétration, de 1 (impossible) à 6 (très rapide). Le marteau-fond de trou est "non recommandé" pour les formations considérées :

	Rotary	Tubage à l'avancement	Rotary – circulation inverse
Sable et gravier non consolidé	5	6	6
Grès peu cimenté	5	-	5
Argile et silts	4	5	5

Sur cette base, il n'apparaît pas de différences significatives entre les vitesses d'avancement au rotary et au marteau-fond-de-trou avec tubage à l'avancement. Le choix de la méthode sera donc conditionné par d'autres considérations, notamment :

- profondeur d'objectif (associée aux capacités du matériel disponible),
- nécessité de caractérisation des venues d'eau à l'avancement,
- coût.

2.4. PRATIQUES OBSERVEES

2.4.1. Equipement des entreprises de forages

Pour des forages d'eau de plusieurs dizaines de mètres en terrains non consolidés, les méthodes présentant les mises en œuvre les plus simples sont souvent privilégiées par les entreprises de forage : forage au battage ou havage avec tubage à l'avancement, Odex. C'est par exemple le cas dans les alluvions, les formations du Plio-Quaternaire dans le Bassin Aquitain, les formations molassiques en Rhône-Alpes et régions voisines.

Pour les forages d'eau de plusieurs centaines de mètres, l'emploi de foreuses "mixtes" à transmission hydraulique est très largement répandu. Il permet de passer du rotary au marteau-fond-de-trou, en choisissant la meilleure adaptation aux variations lithologiques : notamment privilégier le marteau-fond-de-trou pour un meilleur avancement à travers les formations consolidées, et le passage au rotary pour les formations non consolidées. Ce passage d'une méthode à l'autre nécessite plusieurs adaptations, et peut avoir une incidence significative en termes de planning : il est par conséquent loin d'être systématique.

Par exemple, Plote (1986) suggère, lorsque l'épaisseur des terrains meubles est inférieure à 20 m, de préférer la solution du tubage à l'avancement, qui permet l'utilisation exclusive du marteau-fond-de-trou sur toute la hauteur de l'ouvrage. En effet, pour une faible épaisseur, la perte de temps associée à la méthode par rapport au marteau-fond-de-trou traditionnel resterait inférieure à celle associée au passage au rotary (qui implique la fabrication et mise en boue du forage, la modification d'aménagements de chantier).

Dans la pratique, l'emploi de foreuses au marteau-fond-de-trou avec tubage à l'avancement est encore marginal pour les forages de quelques centaines de mètres de profondeur. Dans le cadre de la présente étude, une analyse rapide du matériel utilisé par les 39 entreprises signataires de la Charte de qualité des puits et forages d'eau (liste des entreprises disponible sur <http://www.sfeg-forages.fr>) a été effectuée. Environ la moitié de ces entreprises dispose de supports de communication en ligne complets, et parmi elles deux tiers sont équipés pour du tubage à l'avancement. Dans leur immense majorité elles utilisent les techniques avec entrainement de tube par le taillant. Mais quelques rares entreprises seulement disposent de machines suffisamment puissantes pour une application en forage d'eau supérieur à 100 m.

2.4.2. Outils de forage

A la pratique pour le forage au rotary, il apparaît que les entreprises de forage utilisent très majoritairement des outils tricônes acier dent longue (IADC code 1). L'utilisation d'autres outils (plus onéreux) est souvent réservée à des chantiers avec des enjeux spécifiques :

- Outils à picots longs (IADC code 4 – en règle générale outils reconditionnés) ;
- Trilames : leur utilisation est quasi-anecdotique, probablement car leur application est moins universelle et car il existe moins d'outils reconditionnés sur le marché.

2.4.3. Fluides de forage

Si les données sur les méthodes de forage sont fréquemment disponibles, il n'en est pas de même pour les fluides utilisés. Même dans le cas de forages récents, les cahiers des charges ne définissent généralement pas les fluides ou additifs à utiliser : le choix (et la responsabilité associée) est laissé à l'entreprise de forage.

Il faut également ajouter que le coût des boues spéciales est souvent un frein à leur utilisation, dans le domaine du forage hydrogéologique, dominé par les marchés publics où le critère prix est fréquemment déterminant. Ceci peut être parfois au détriment de la productivité potentielle des ouvrages.

2.4.4. Pratiques sur des secteurs représentatifs

Quelques coupes de forages d'eau représentatives, issues de la Banque du Sous-Sol sont données en Annexe.

a) Bassin Aquitain

Dans le Bassin Aquitain, les forages destinés à l'alimentation en eau potable qui visent les formations profondes non consolidés (Eocène dans certains secteurs de Gironde et limitrophes, sables infra-molassiques dans la partie Sud-Est) présentent des coupes relativement similaires (cf. paragraphe 3.4.1). Pour des profondeurs de l'ordre de 300 à 600 m, les ouvrages ont tous été réalisés au rotary à la boue, au tricône. Ceci se retrouve logiquement dans les équipements et le savoir-faire des entreprises de forage locales.

Les informations concernant les fluides utilisés sont rarement disponibles pour les forages anciens. Pour les points dont la donnée est disponible, l'utilisation de boue bentonitique, sans additif, est quasi-systématique.

b) Bassin Parisien

Dans le Bassin Parisien, l'analyse s'est focalisée sur les nappes profondes non consolidées de l'Albien et Néocomien, stratégiques pour l'alimentation en eau potable. Les données les plus récentes sur les forages ne sont pas systématiquement disponibles.

La grande majorité des forages a été réalisée au rotary à la boue bentonitique. Quelques documents isolés font état de l'utilisation de circulation inverse (forage à l'Albien de Courtenay, code BSS 03663X0026, 498 m de profondeur).

Pour des formations moins profondes, de l'ordre de 200 à 300 m, l'utilisation du marteau-fond-de-trou avec tubage à l'avancement s'accroît. La conjonction du maintien des terrains et de la caractérisation des venues d'eau est particulièrement appréciée pour la recherche d'eau.

c) Molasses du Bas-Dauphiné

Dans les formations non-consolidées des Molasses du Bas-Dauphiné, les profondeurs des forages peuvent atteindre 200 à 300 m. Tous les ouvrages récents recensés dans cette gamme de profondeur ont été réalisés au rotary à la boue, avec un outil tricône : forage AEP de Montrigaud (07715X0047 - profondeur 264 m – réalisé en 2009), forage AEP de Montoisson (08423X0073 – profondeur 300 m - réalisé en 2003), forage AEP de Montmeyran (08188X0052 – 280 m –réalisé en 2001). Pour tous ces ouvrages, les avant-trous sont généralement réalisés par havage ("benoto"), qui permet une traversée des formations superficielles non consolidées en grand diamètre.

2.4.5. Autres exemples notables

a) Forage de Plan de Phasy (Guillestre, 05)

Ce forage profond de 400 m a été réalisé en 1992 afin de recapter le gisement thermominéral de Plan-de-Phasy, dans une zone fortement tectonisée affectée par plusieurs contacts anormaux chevauchants entre plusieurs nappes Briançonnaises. Originellement, les seules émergences de ce gisement étaient des sources hyperminéralisées, dans les alluvions situées au pied du Rocher de Barbein (calcaires du Trias). Le détail des travaux est donné dans le rapport BRGM RR-37432-FR (Silvestre, 1993). L'ouvrage a traversé successivement :

- 114 m d'alluvions non consolidées à galets et graviers (contre 50 m attendus), avec deux niveaux aquifères fortement productifs (jusqu'à 80 m³/h en soufflage) ;
- près de 300 m de calcaires dolomitiques, qui se sont avérés fortement altérés localement en sables fins bouillants, par la conjonction de la tectonique et de l'hydrothermalisme ; ces zones broyées correspondaient de surcroît à des venues artésiennes par gaz-lift.

Du fait des nombreuses difficultés techniques, le forage a été réalisé en plusieurs phases consécutives :

- phase 1 – 1^e foreuse : i) rotary en circulation inverse avec boue bentonitique : avancement difficile, éboulements répétés ; pose d'un premier tube 14" cimenté à 80 m ; ii) puis rotary en circulation inverse avec boue bentonitique alourdie à la baryte, ancrage d'un second tube 10"3/4 dans le substratum dolomitique à 121 m ; au-dessous, essai de consolidation des terrains par un bouchon de ciment : échec de la reprise de foration 9"7/8 dans les calcaires altérés ;
- du fait de l'inefficacité de la méthode par circulation inverse à ces profondeurs, les travaux ont été interrompus pour acheminer une seconde foreuse ;
- phase 2 – 2^e foreuse : rotary à la boue alourdie à la baryte, de 170 à 400 m ; avancement difficile, plusieurs nettoyages et reprises de trou avant équipement ;
- dans les formations fines non consolidées, les avancements mesurés étaient bien meilleurs au rotary "classique" (10 m/j) qu'en circulation inverse (3,5 m/j).

Cet exemple est révélateur des difficultés qui peuvent être rencontrées en forage d'eau, lorsque plusieurs facteurs défavorables s'additionnent : absence de tenue des terrains, venues d'eau artésiennes. Il met également en avant l'inefficacité de certaines pratiques qui ont pu être tentées, comme la consolidation des terrains par cimentation. Enfin, dans ce cas, les contraintes sanitaires

associées à la destination du forage restreignent les éventuelles solutions techniques qui auraient pu être apportées par des additifs à la boue.

b) Forages thermaux de Montrond-les-Bains (42)

La station thermale de Montrond-les-Bains se situe au centre de la Plaine du Forez, vaste dépression comblée à l'Eocène et à l'Oligocène par des sédiments continentaux torrentiels et lacustres sur plusieurs centaines de mètres (alternances de graviers, sables et argiles). Le forage d'exploitation originel, profond de 502 m, a été réalisé au battage à la fin du XIXe siècle ; il est constitué de plusieurs tubes en acier riveté télescopés, sans cimentations.

Deux campagnes distinctes ont été réalisées pour recapter les eaux thermales :

- une première campagne en 1988 : un forage de 529 m a capté les horizons aquifères profonds, au-delà de 462 m (Vigouroux et al., 1988) ; il a été réalisé au rotary à la boue bentonitique ; après équipement en ouvrage d'exploitation, le forage s'est avéré inexploitable car il produisait une eau incrustante difficilement gérable, avec une minéralisation totale très supérieure au forage historique ;
- une seconde campagne entre 1999 et 2004 : un diagnostic d'ouvrage a montré que le forage historique sollicitait en réalité plusieurs horizons aquifères sur toute sa hauteur, aussi trois forages ont été réalisés au marteau-fond-de-trou avec tubage à l'avancement, jusqu'à 300 m de profondeur (Squarcioni, 2015) ; la technique de forage a permis la caractérisation successive et individualisée de tous les horizons sableux ou graveleux productifs, pour adapter ensuite l'équipement des forages à leur captage sélectif.

Cet exemple démontre l'intérêt que peuvent avoir les techniques de forage à l'air avec tubage à l'avancement, pour la caractérisation de la ressource et une meilleure adaptation des équipements. Dans ce cas précis, une étude géochimique et isotopique approfondie a pu être conduite sur la ressource pour appréhender son fonctionnement global (Gal, 2006).

3. Modalités d'équipement en ouvrages d'exploitation

3.1. CADRE REGLEMENTAIRE

L'Arrêté « forages » du 11 septembre 2003 ne pose pas d'obligations spécifiques aux aquifères non consolidés. Son guide d'application insiste, pour la garantie de qualité et de pérennité de l'ouvrage, sur l'adaptation des caractéristiques des matériaux tubulaires à l'ouvrage, aux milieux traversés et à la qualité des eaux souterraines : épaisseur, résistance à la pression et à la corrosion. Plusieurs prescriptions sont générales, et non spécifiques aux aquifères non consolidés :

- pour les matériaux : i) pour les tubes aciers, homogénéité des matériaux pour éviter l'effet de pile et la corrosion associée ; ii) pour les tubes PVC, la limitation en profondeur liée aux contraintes mécaniques ;
- pour la ressource en eau, nécessité d'isoler les différentes formations aquifères rencontrées par cimentation.

Certaines prescriptions associées à la mise en place de la crépine et du massif filtrant sont cependant plus spécifiquement applicables aux aquifères non consolidés :

- la nécessité de détermination préalable de la granulométrie des terrains est clairement évoquée ;
- la crépine, placée face aux niveaux producteurs, doit être équipée de centreurs pour assurer la répartition correcte du massif filtrant ;
- un tube à sédiment est placé en pied de crépine (le document indique un élément d'environ un mètre de hauteur), et fermé par un bouchon de fond ;
- l'entraînement de particules fines doit être évité ;
- le massif de gravier est constitué d'un gravier siliceux, roulé, propre, calibré et homogène ; son épaisseur est comprise entre 3" et 8" ("en général"), et la réserve est comprise entre 5 et 10 m ; il est mis en place de manière gravitaire et sous circulation.

En outre le CCTG – Fascicule n°76 indique :

- la personne responsable du marché doit fournir à l'entrepreneur des renseignements sur la nature des terrains et des eaux souterraines susceptibles d'être rencontrés ; l'entrepreneur propose par la suite les matériaux qui lui paraissent le mieux adaptés ;
- en l'absence de précisions du cahier des charges, il appartient à l'entrepreneur de proposer la géométrie des matériaux tubulaires qu'il compte utiliser (diamètre, épaisseur, ouverture et pourcentage de vides des crépines), en adéquation avec les contraintes du terrain ;
- le massif additionnel peut comporter : i) un massif filtrant autour de la crépine, ii) un massif de soutènement des terrains autour des tubes, notamment lorsque ceux-ci présentent des risques d'éboulement pouvant être préjudiciables à l'intégrité de l'ouvrage ;
- plusieurs restrictions concernant les crépines : i) le pourcentage d'ouverture ne devra pas être inférieur à 10% sauf cas particuliers ; ii) les ouvertures de crépines doivent être déterminées préalablement par analyse granulométrique, si possible sur des échantillons non remaniés en place.

En-dehors de la notion générale d'adéquation entre les équipements et les terrains, la réglementation française ne pose que très peu de restrictions quantitatives spécifiques aux aquifères non consolidés.

3.2. CADRE NORMATIF

La norme NF X 10-999 reprend les mêmes notions générales d'adéquation entre les terrains et l'équipement de captage (crépines et massif additionnel). Le recours à une analyse granulométrique des terrains est seulement suggéré. Elle ne serait nécessaire qu'en cas de méconnaissance des formations. Quelques notions supplémentaires sont ajoutées :

- l'obligation de mise en place de centreurs le long des crépines (sauf dans le cas de tubage à l'avancement), avec un intervalle maximum de 12 m ;
- l'existence de crépines pré-gravillonnées, ou la possibilité d'utiliser une double-colonne de crépines remplie de billes calibrées ;
- la nécessité de désinfecter le massif de gravier pour des usages alimentaires et le thermalisme ;
- la mise en place d'une "réserve à gravier" au-dessus du toit de la hauteur crépinée, afin de compenser les éventuels tassements ultérieurs, avec un volume équivalent à 10% du volume total de gravier si possible ;
- plusieurs impératifs liés à la mise en place du massif filtrant sont également posés. Son épaisseur ne doit notamment pas être inférieure à 75 mm, soit environ 3", sauf pour les tubes de diamètre extérieur inférieur à 165 mm. Afin de garantir une répartition homogène, il doit être mis en place sous circulation constante, avec un contrôle continu à la sonde.

Lorsque la granulométrie est grossière, ou lorsqu'elle est hétérogène avec des éléments grossiers abondants, le massif peut se mettre en place de manière naturelle (auto-gravillonnage) : la mise en place d'un massif filtrant est alors facultative.

En fin de développement du forage, la norme impose une teneur maximale en sédiments de 10 mg/L dans l'eau d'exhaure en cas d'usage pour la consommation humaine.

3.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE

3.3.1. Matériaux

De nombreuses préconisations concernant les équipements de forage sont présentes dans la bibliographie, notamment concernant le choix des matériaux. Lopoukhine et al. (1998) citent notamment les contre-indications propres à chaque matériau :

- acier : sensibilité à la corrosion ;
- aciers inoxydables : sensibilité aux rayures (pouvant affecter la couche de passivation), sensibilité chimique selon la nuance à certains éléments dissous (aux chlorures, sulfures, hydrogène, etc), résistance mécanique généralement amoindrie par rapport à l'acier « ordinaire » ou API ;
- PVC : sensibilité aux chocs, à la température, aux chlorures ;
- acier revêtu ou matériaux composite : sensibilité aux chocs et rayures.

Ces restrictions peuvent notamment affecter les dimensionnements (pour la résistance à l'écrasement), mais ne sont pas spécifiques aux aquifères non consolidés. Dans le cas de la présente étude, les préconisations bibliographiques sont exclusivement liées à la colonne captante.

3.3.2. Crépines

Pour le dimensionnement des crépines, Bart (2011) donne les valeurs-guides suivantes (dont les ordres de grandeur se retrouvent dans plusieurs ouvrages de référence) :

- le diamètre intérieur est conditionné par la vitesse ascensionnelle de l'eau, qui doit rester inférieure à 1,5 m/s pour rester en régime laminaire ;
- l'ouverture des crépines ("slot") est conditionné par la granulométrie des formations :
 - pour un forage autodéveloppé : le slot retient au minimum 40 à 50% de la formation,
 - pour un massif filtrant additionnel : le slot retient au moins 90% du gravier.

Afin de minimiser les pertes de charges imputables à l'équipement du forage, les ouvrages de référence privilégient l'utilisation des crépines à fil enroulé.

Pour leur positionnement, Detay (1993) préconise plusieurs investigations préliminaires :

- diagraphies instantanées, pertes de boues ;
- carottage ;
- analyse granulométrique des échantillons ;
- logs géophysiques (diagraphies).

Pour les nappes captives, Mabillot (1995) préconise de crépiner 70 à 80% de l'épaisseur de l'aquifère. Dans la pratique, c'est fréquemment toute la hauteur aquifère qui est équipée.

3.3.3. Massif filtrant

Concernant le massif filtrant, Mabillot (1995) insiste sur son caractère obligatoire dans deux conditions seulement:

- si le terrain est constitué de sables fins : diamètre efficace $d_{10} < 0,25$ mm pour Solages (1979) ;
- si la granulométrie est homogène : coefficient d'uniformité (Cu) inférieur à 5 pour Solages (1979) ou $Cu < 2.5$ selon d'autres auteurs.

Dans les autres cas (sable moyen à grossier et hétérogène), le massif filtrant est facultatif. S'en affranchir permet de choisir un diamètre et une ouverture plus large pour la crépine et oblige à effectuer un développement plus long de manière à éliminer les particules fines. Cette méthode est appelée l'auto-développement.

Si le massif filtrant est nécessaire, le choix du calibre repose sur l'analyse granulométrique des terrains aquifères où le diamètre caractéristique d_{10} exprime le diamètre pour un tamisat cumulé correspondant à 10% du poids de l'échantillon. En d'autres termes, un tamis de diamètre d_{10} retient 90% de l'échantillon (en poids). Les préconisations pour les forages hydrogéologiques varient selon les auteurs :

- compris entre $7d_{10}$ et 2 fois cette valeur pour des formations homogènes (Règle de Johnson, citée par Lauga, 1990) ;

- gravier uniforme égal à 5 fois le d_{25} pour l'Australian Drilling Industry Training Committee;
- d_{30} du gravier 4 à 6 fois supérieur à celui de la formation (Mabillot, 1971 ; Driscoll, 1986) ; pour des formations fortement hétérogènes contenant des silts ou des interlits argileux, le coefficient multiplicateur peut être de 6 à 10 (Driscoll, 1986);
- d_{50} du gravier compris entre 4 et 6 fois le d_{50} de la formation et distribution parallèle à celle de la formation (Roscoe-Moss, 1990) ;
- coefficient d'uniformité compris entre 2 et 2,5. (Detay, 1993).

Au-delà de la seule composition, les auteurs insistent sur la préservation des caractéristiques du gravier lors de sa mise en place : il est notamment primordial d'éviter toute séparation des granulométries qui serait préjudiciable au rôle de filtre. Par exemple la gravité a un effet de ségrégation des grains les plus grossiers (lourds) vis-à-vis des grains plus fins. Par conséquent, l'introduction du gravier par gravité est exclue pour les forages profonds. Elle doit se faire en continu sous pression, et sous circulation (boue ou eau), à vitesse lente. Mabillot (1995) préconise de rester au-dessous de 2 tonnes par heure.

3.3.4. Développement

Réalisé après équipement, le développement vise à compenser le dommage aux formations lié au forage, pour restaurer les propriétés hydrauliques originelles de la formation, voire les améliorer dans son environnement immédiat.

Plusieurs méthodes sont évoquées dans la bibliographie, avec leurs préconisations propres.

a) Développement mécanique

Le développement par injection d'air ("pneumatique" pour certains auteurs) est globalement privilégié pour les aquifères sableux non consolidés. Deux méthodes doivent être distinguées :

- l'air-lift, ou émulseur, utilise une double colonne (deux tubes emboîtés) ; l'injection d'air par la colonne intérieure crée une aspiration à l'intérieur du dispositif, un flux ascendant se met en place dans la colonne d'eau si les conditions d'immersion du dispositif sont suffisantes ;
- la seconde méthode est le soufflage qui consiste à émettre de l'air comprimé par un simple tube (souvent les tiges de forage) ; contrairement à l'air lift, l'air envoyé par soufflage dans le forage n'est pas guidé lors de sa remontée à la surface.

L'air-lift est préféré au soufflage car il évite de renvoyer dans la formation ou le massif filtrant les particules fines ayant pénétré dans l'ouvrage lors du développement, et permet ainsi un meilleur curage du fond de l'ouvrage ; en outre l'air lift limite les impacts physico-chimiques résultant de l'introduction d'oxygène dans le milieu souterrain souvent réducteur, pouvant entraîner par exemple des précipitations de fer ou de manganèse, un développement bactérien ou une accélération de la corrosion) ; face aux crépines, le soufflage est proscrit pour les raisons précédemment évoquées et l'air-lift doit être utilisé avec précaution, pour éviter la déstabilisation du massif filtrant ou encore les phénomènes de dépression / collapse ;

Le pistonnage est une alternative qui présente l'avantage de la facilité de mise en œuvre, mais le désavantage de générer un dépôt des sédiments fins en fond d'ouvrage ; son efficacité réelle est questionnée par certains auteurs, l'expérience montre pourtant des améliorations significatives dans les aquifères sableux non consolidés.

Le surpompage permet également d'évacuer les matériaux fins, en générant des vitesses très supérieures à celles prévues en exploitation ; il présente plusieurs inconvénients, dont

l'inefficacité sur les ponts de sable, car il ne génère pas d'inversions de flux dans le massif et la formation (Mabillot, 1995) ; ceci peut être compensé par la génération d'une coup de bélier à l'arrêt de la pompe, en enlevant le clapet anti-retour de la pompe ; comme le pistonnage, il peut générer un dépôt en fond de forage ; toutefois, le surpompage est souvent générateur de désordres dans le massif filtrant lorsque les vitesses critiques sont dépassées (de manière empirique, la vitesse d'entrée dans la crépine ne doit pas excéder 3 cm/s). Les coups de béliers sont également des facteurs d'instabilité du massif filtrant aboutissant à des brèches dans l'homogénéité du massif filtrant.

Le jetting consiste en une injection d'eau sous haute pression, perpendiculaire à la paroi du tube ou de la crépine, éventuellement combiné au pompage ou air-lift ; il est également préconisé dans les ouvrages de référence, comme une méthode efficace et simple à mettre en œuvre.

b) Développement chimique

Il doit être associé à une action mécanique, mais est proscrit dans des formations finement litées avec alternances sablo-argileuses :

- les polyphosphates visent à disperser la fraction argileuse ; cependant ils fournissent également des nutriments potentiels pour les microorganismes, et sont donc susceptibles de favoriser l'activité bactérienne ;
- d'autres dispersants sont proposés par les fournisseurs (polyacrylamides par exemple), mais peuvent poser des problèmes de contamination des ressources utilisées pour la consommation humaine.

3.4. PRATIQUES OBSERVEES

3.4.1. Bassin Parisien et Bassin Aquitain

a) Choix des équipements

Dans la pratique, les caractérisations préalables à l'équipement en forage d'exploitation comprennent en général une diagraphie gamma-ray et des analyses granulométriques du réservoir. Plus occasionnellement, des investigations plus poussées sont conduites :

- diagraphies complémentaires : résistivité, diamètreur ; ceci est appliqué pour affiner le calage géologique et hydrogéologique ;
- carottage et analyses laboratoire : très rare car chronophage et coûteux, appliqué si un enjeu fort le justifie ; c'est par exemple le cas pour plusieurs forages à l'Albien dans le Bassin Parisien ; pour le forage à l'Albien de Montbouy par exemple, le carottage des 2 premiers niveaux de sables a démontré une argilosité plus marquée que prévu, entraînant la décision de poursuite du forage pour capter le 3e niveau de sables de l'Albien.

Concernant le massif filtrant, la technique de l'auto-développement est très peu répandue. En présence de formations non-consolidées la pratique quasi-exclusive en hydrogéologie dans ces bassins qui contiennent souvent des niveaux de sable fins est l'adjonction d'un massif filtrant, quelle que soit la granulométrie des terrains.

b) Crépines et massifs filtrants

L'analyse des coupes techniques permet de constater de fortes similitudes entre les ouvrages "historiques" profonds d'alimentation en eau sur le Bassin Parisien et le Bassin Aquitain, avec en grande majorité les coupes techniques suivantes :

- chambres de pompage en acier API Ø 13"3/8 , ancrées dans l'éponte au toit du réservoir et cimentées ;
- colonnes de captage Ø 8" en acier inoxydable (304L), crépines à nervures repoussées ou persiennes ; présence d'une colonne de tube plein de plusieurs dizaines de mètres (réserve de gravier), avec crépine-signal au sommet ; sauf risque de dénoyage, on constate que les crépines sont systématiquement positionnées sur toute la hauteur des formations aquifères. L'ouverture des crépines ("slot") est généralement de l'ordre de 1 mm.
- massif de gravier siliceux roulé, d'épaisseur supérieure à 3" : le réservoir faisait généralement l'objet d'un alésage à un diamètre compris entre 15 et 20".

Sur de nombreux ouvrages, les équipements de captage ont rempli leurs fonctions de manière satisfaisante. Les principaux retours d'expériences après plusieurs dizaines d'années d'exploitation sont les suivants :

- les inspections de forage font apparaître des crépines en excellent état mécanique, tandis que les tubages API sont affectés par la corrosion ;
- certains ouvrages sont affectés par un tassement du massif de gravier ; cette coupe technique type permet cependant une recharge aisée du massif par l'espace annulaire ;
- dans certains secteurs à granulométrie très fine, la complétion au droit des horizons aquifères s'est avérée peu efficace : sables verts de l'Albien dans le Bassin Parisien, sables gris de l'Eocène dans le secteur Sud de Bordeaux ; ces secteurs sont affectés par des venues de sable à travers les massifs, qui génèrent une usure prématurée des équipements de pompage et imposent la mise en place de décantations à l'exhaure .

Les diagnostics conduits en routine sur les forages au Sud de Bordeaux produisent un retour d'expérience intéressant :

- ils montrent généralement des venues de sable très ponctuelles, par conséquent imputables à des défauts de mise en place du massif de gravier ;
- ils mettent parfois en évidence des tassements du massif de gravier, nécessitant une recharge : ceci met en exergue l'importance de préserver un accès au massif de gravier pour pouvoir procéder à ces opérations.

Sur des forages plus récents à partir des années 80-90, les crépines à fil enroulé renforcées ont progressivement supplanté les crépines à nervures repoussées ou persiennes. Sur le Bassin Parisien principalement, ceci s'est traduit par une diminution significative :

- des ouvertures de crépines utilisées, de 0,4 à 0,8 mm sur les ouvrages plus récents ;
- du calibre des massifs de gravier, de 0,4 à 1,4 mm, pour une adaptation notamment à la granulométrie fine de certains horizons.

Il est également intéressant de noter que les maîtres d'ouvrage, dont les forages ont atteint les sables verts de l'Albien, ont parfois renoncé à les capter, estimant que le faible gain de productivité ne compenserait pas le surcoût d'équipement, tel le forage de Bussy-en-Othe (Jauffret et al., 1995). En effet d'autres solutions techniques existent mais restent très marginales dans le domaine du forage hydrogéologique, car leur surcoût n'est généralement pas compensé

par l'enjeu qui est accordé aux installations. Le retour d'expérience est insuffisant dans le domaine étudié : double crépines, massifs filtrants alternatifs au gravier, crépines avec massifs intégrés, etc. Ces techniques ont préférentiellement été testées sur des forages géothermiques dans le Bassin Parisien, objet de la Tâche 2.

c) Développement

Les données sont rarement disponibles sur les méthodes mises en œuvre pour le développement des forages en hydrogéologie. Ce point est souvent peu détaillé dans les cahiers des charges remis aux entreprises de forage, et par conséquent laissé à leur appréciation. Dans le contexte considéré, dominé par les marchés publics avec un critère "prix" souvent discriminant, cette absence de contrainte établie peut-être favorable au "moins-disant technique", et par conséquent préjudiciable à la pérennité du forage.

Sur les comptes rendus de forages profonds effectués au rotary dans le Bassin Parisien et le Bassin Aquitain, la succession suivante se retrouve fréquemment :

- injection de polyphosphates (hexamétaphosphates en général) ;
- développement sous air-lift ;
- désinfection ;
- développement complémentaire par pompages alternés ;.

Le développement par *jetting* est plus fréquemment utilisé en régénération / réhabilitation de forage.

3.4.2. Grès du Trias Inférieur (Buntsandstein)

Nguyen (2010) a effectué une analyse des forages dans les grès du Trias inférieur en Lorraine. Parmi les problèmes identifiés, l'occurrence d'ensablements sur des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres est particulièrement prégnante. Ce phénomène est lié à l'absence d'équipements au droit des horizons productifs, soit totale, soit partielle au droit des horizons considérés comme consolidés. Dans certains cas la réhabilitation imposait la mise en place d'un équipement complet de captage, incluant un massif filtrant, face aux horizons productifs.

Ceci démontre que même dans les formations clastiques d'apparence consolidées, la mise en place de crépines et massif de gravier peut être préconisée pour la pérennité de l'ouvrage.

3.4.3. Forage de Plan de Phasy (Guillestre, 05)

Les difficultés associées aux tenues des terrains lors de la réalisation du forage thermal de Guillestre ont déjà été évoquées au paragraphe 2.4.5 L'utilisation de boue bentonitique et de baryte imposée par ces difficultés a considérablement gêné les observations hydrogéologiques au cours de l'avancement, qui se sont résumées à 2 essais hydrauliques ponctuels et quelques mesures lors de reprises d'artésianisme.

Le positionnement des crépines s'est par conséquent basé sur les observations géologiques, en intégrant une forte incertitude sur les profondeurs des venues, pour une hauteur totale crépinée de 96 m sur une colonne de 247 m. Les besoins exprimés pour ce projet n'étaient que de quelques m³/h, l'équipement choisi se singularise des pratiques usuelles :

- matériaux inox 316L, diamètre extérieur 4"1/2 ;
- lumières : fente oblongues de 200 x 2 mm, sur 4 génératrice orthogonales espacées de 200 mm ; coefficient d'ouverture résultant de 1,5% ;
- massif de gravier siliceux roulé 3-5 mm.

Avant équipement, l'ouvrage présentait déjà une faible productivité, liée aux propriétés hydrauliques médiocre des terrains, avec des débits spécifiques inférieurs à 0,5 m³/h par mètre de rabattement. Il apparaît que l'équipement génère des pertes de charge supplémentaires, supérieures à 15 m à 20 m³/h.

Dans ce cas précis, l'équipement choisi est pénalisant en termes de pertes de charges mais moins onéreux qu'un équipement renforcé à fil enroulé. Il n'est acceptable qu'au regard des faibles besoins quantitatifs pour le projet.

4. Modalités de surveillance et maintenance

4.1. CADRE REGLEMENTAIRE

L'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 ("arrêté Forages") impose un entretien régulier des forages d'eau. Pour les ouvrages qui interceptent plusieurs aquifères superposés ou pour ceux situés dans un périmètre de protection de captages AEP, une inspection périodique (au minimum décennale) est prescrite pour valider l'étanchéité des complétions. Aucune méthode spécifique d'investigation n'est imposée. Aucune recommandation spécifique aux forages en aquifères non consolidés n'est émise.

Le guide d'application souligne la nécessité d'entretien et de surveillance des forages. Il recommande a minima les opérations suivantes, dont plusieurs sont plus particulièrement applicables aux forages captant des aquifères non consolidés :

- contrôle des pertes de charge du forage à fréquence semestrielle ;
- contrôle du fond du forage à chaque remontée de pompe et au moins tous les trois ans ;
- contrôle du sommet du massif de gravier additionnel à fréquence semestrielle ;
- contrôle de l'état intérieur du forage par inspection vidéo, éventuellement complété par un contrôle de cimentation par CBL-VDL ;
- nettoyage du forage par curage, brossage, et éventuellement traitement chimique.

4.2. CADRE NORMATIF

La norme NF X 10-999 recommande plusieurs contrôles périodiques, qui rejoignent les recommandations réglementaires. S'y ajoute seulement un suivi de la qualité de l'eau (analyses fonction de l'usage).

4.3. PRECONISATIONS DE LA BIBLIOGRAPHIE

M. Detay (1993) expose également des préconisations proches de la réglementation actuelle, avec :

- des mesures simples périodiques : débits, niveaux, éventuellement piège à sable ;
- des contrôles simples annuels : pompage d'essai, analyse ;
- des contrôles tous les 3 à 5 ans : contrôles internes par diagraphies et inspection endoscopique.

Dans le cas des aquifères clastiques non consolidés, le risque spécifique pour les équipements est associé au colmatage des crépines. S. Bart (2011) distingue trois types de colmatage :

- physique : par invasion de silts et argiles (lié à un défaut d'équipement, une migration progressive) ;

- chimique : précipitations minérales ;
- biologique : expansion de biofilm.

Afin d'éviter le vieillissement prématuré associé au colmatage, plusieurs précautions simples en termes d'exploitation sont exposées dans les ouvrages de référence :

- maintenir un régime d'exploitation stable, éviter les arrêts-démarrages trop fréquents,
- éviter le dénoyage des crépines,
- respecter le débit d'exploitation préconisé, pour maintenir les vitesses d'entrée d'eau sous les limites critiques,
- désinfecter tout matériel descendu dans le forage.

A l'inverse, les phénomènes de corrosion peuvent générer une dégradation des matériaux et à terme des perforations dans la colonne captante, annihilant le rôle de filtre. Au-delà de l'importance du choix initial des matériaux, la réalisation d'inspections périodiques permet d'évaluer ce phénomène et engager le cas échéant des actions préventives.

4.4. PRATIQUES OBSERVEES

Dans la pratique, ces préconisations usuelles sont émises à l'issue de la réalisation des forages, dans les dossiers des ouvrages exécutés par exemple. Certaines contraintes seront en général respectées car imposées réglementairement : débit maximum, surveillance analytique, plus rarement mesures et inspection.

De même, la réalisation de diagnostics périodiques des forages, depuis qu'ils sont imposés par la réglementation, devient courante pour les forages d'alimentation en eau potable ou eau minérale, avec quelques limitations :

- la fréquence est au mieux décennale, des fréquences plus élevées sont très rares ;
- le "diagnostic" se limite souvent à une inspection endoscopique seule, sans mesures complémentaires ; ce type d'investigation reste subjectif, fortement dépendant de la visibilité dans la colonne d'eau, et par définition insuffisant pour identifier des défauts d'étanchéité ou évaluer objectivement l'état de dégradation des matériaux ; dans plusieurs cas par exemple, des diagraphies physico-chimiques ont mis en évidence des perforations indiscernables visuellement.

Ces diagnostics sont bien plus occasionnels pour les forages industriels ou agricoles, à l'exception de certains secteurs isolés sur lesquels les services de l'Etat exercent une pression particulière.

Par contre, le reste des préconisations reste soumis à la bonne volonté du maître d'ouvrage ou de l'exploitant. Et même si des données de base (débit, rabattement) sont consignées, il n'a pas nécessairement la compétence technique pour les analyser au regard du vieillissement de l'ouvrage. Il est également encore fréquent d'observer des pompes d'exploitation asservies à la demande, et exploitées par à-coups sans démarrage progressif, ce qui peut être préjudiciable à la colonne captante à terme.

5. Conclusion : pratiques relatives aux forages hydrogéologiques en aquifères sableux peu ou pas consolidés

5.1. REALISATION DES FORAGES

Dans la pratique, la grande majorité des forages hydrogéologiques profonds en aquifères non consolidés est réalisée de manière très classique, au rotary à la boue bentonitique, selon un phasage qui a très peu évolué depuis plusieurs dizaines d'années. Les choix des outils, des fluides et éventuels additifs, des paramètres de forage associés sont très fréquemment laissés à l'appréciation de l'entreprise de forage (et par conséquent soumis à sa responsabilité). La bonne réalisation des ouvrages repose par conséquent essentiellement sur l'expérience et le savoir-faire de l'entrepreneur. Il est à noter que de nombreux additifs sont proscrits dans le domaine, car potentiellement contaminants pour les ressources en eau souterraine.

Lorsque certains enjeux sont présents, pour des forages allant jusqu'à 200-300 m de profondeur, l'utilisation du marteau-fond-de-trou avec tubage à l'avancement est utilement choisie : l'identification des potentialités aquifères (quantité et qualité) des horizons traversés au fil de l'avancement est un réel atout.

5.2. EQUIPEMENT DES FORAGES

Il apparaît que l'inconvénient majeur du forage au rotary à la boue, dans le domaine de l'hydrogéologie, est le défaut de caractérisation des ressources aquifères à l'avancement. Il est pourtant primordial d'optimiser l'équipement, en adéquation avec les spécificités de l'aquifère capté. Les investigations préalables à l'équipement de captage des forages se limitent fréquemment à des diagraphies différées (gamma-ray, éventuellement résistivité ou diamètre) et des analyses granulométriques sur les cuttings. Dans plusieurs cas, la réalisation de carottages dans les formations cible a permis d'adapter les équipements (profondeur, dimensionnement). Cependant, le surcoût de ces opérations est souvent un frein à leur réalisation, aux dépens des gains potentiels à long terme.

L'analyse des coupes techniques sur les principales ressources aquifères sableuses profondes en France montre de fortes similitudes quelle que soit la région. Historiquement, les dimensions des crépines et calibres des massifs filtrants additionnels répondaient visiblement à un "standard", observable sur l'ensemble du territoire. Cette pratique a montré des limites d'efficacité dans certains secteurs, dans des formations très fines et de granulométrie homogène. Face à ce constat, la recherche de la meilleure adéquation entre les terrains, l'équipement et les besoins quantitatifs s'est progressivement imposée comme incontournable dans les secteurs géographiques concernés. Toutefois en-dehors de ces aquifères reconnus "à problèmes", elle n'est pas systématiquement prescrite et pratiquée, alors même qu'elle pourrait contribuer à optimiser la productivité des ouvrages.

5.3. SURVEILLANCE, ENTRETIEN

Après plusieurs années, voire dizaines d'années d'exploitation, les forages montrent fréquemment :

- des tassements du massif de gravier nécessitant une recharge ; ce phénomène doit être anticipé dans la définition de nouvelles coupes de forages : il est impératif de préserver un accès au massif de gravier, la pose d'une colonne pleine avec cimentation dans le prolongement de la colonne captante est donc à proscrire ; ceci impose évidemment de mettre en place une hauteur de croisement entre les tubes suffisante pour éviter le soulèvement du massif ;
- des venues de turbidité très localisées, liées à un défaut du massif filtrant ; dans ce cas, les exploitants ou maîtres d'ouvrage privilégient fréquemment l'adjonction de dispositifs de traitement en surface ; la réhabilitation du forage sera considérée seulement comme solution ultime ;
- des détériorations de la productivité ou de la qualité de l'eau associées soit au colmatage des crépines, soit à leur détérioration par corrosion, nécessitant des solutions curatives lourdes (réhabilitation) ; elles peuvent être minimisées ou ralenties en mettant en place des actions préventives simples (contrôle et entretien).

Les évolutions réglementaires ont conduit progressivement les maîtres d'ouvrage et exploitants à accroître le suivi de leurs installations. Cependant, en l'absence d'analyse des données acquises et de compétences techniques, ce suivi ne génère souvent pas d'actions préventives concrètes.

5.4. BILAN

D'une manière générale, on constate que les préconisations concernant les bonnes pratiques de dimensionnement et de suivi / entretien des ouvrages existent dans la bibliographie. Mais elles ne sont pas systématiquement exigées et appliquées dans le domaine de l'hydrogéologie. Ceci est principalement lié à leur surcoût, dans un domaine fortement concurrentiel dominé par les marchés publics (dans lesquels le critère "prix" est souvent discriminant, potentiellement au détriment de l'efficacité et de la pérennité des ouvrages).

Ces observations soulignent principalement les impératifs suivants :

- sensibilisation des maîtres d'ouvrages / exploitants aux spécificités et aux risques associés à l'exploitation des aquifères sableux, leur imposant de s'adjoindre une expertise technique pour la réalisation et le suivi des installations souterraines ;
- renforcement et spécification des contraintes techniques dans les cahiers des charges relatifs aux réalisations de forages sur les points suivants :
 - caractérisation des terrains aquifères et recherche de la meilleure adéquation des équipements,
 - méthodes d'équipement et de développement.

6. Bibliographie / Documents consultés

AFNOR. *Norme NF X-10-999 – Forage d'eau et de géothermie – Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages*. 2014

BART S., *Recommandations sur le choix des équipements de forage d'eau – Rappel des bonnes pratiques*. Note Johnson Screens, 2011

BARAT A., *Réalisation d'un forage thermal à Montrond-les-Bains – Compte-rendu des travaux – Premiers résultats*. Rapport BRGM 88-SGN-932-RHA, 1988.

BRETTE G., MAGET P., MONDAIN P.H., *Alimentation en eau potable du Syndicat de la Nivelle, Forage à l'Albien à Montbouy (Loiret) – Dossier des ouvrages exécutés*. Rapport BRGM 89 SGN 115 CEN, 1989.

DEGALLIER R., *Colmatage des puits et forages – Manuel pratique*. Rapport BRGM 85 SGN 051 EAU. 1985

DETAY M., *Le forage d'eau – Réalisation, entretien, réhabilitation*. Masson, 1993.

DRISCOLL F.G., *Groundwater and Wells – Second edition*. Johnson Division, 1986

GAL F., *Etude géochimique et isotopique des eaux superficielles du bassin versant du Furan et des eaux minérales du graben du Forez, Est du Massif Central français*. Thèse de 3^e cycle. Université Jean Monnet – Saint-Etienne, 2006.

JAUFFRET D., TOUBIN J., *Synthèse hydrogéologique du réservoir des sables albiens dans le Sénonais-Gâtinais (89) pour la sécurité des approvisionnements en eau potable publique*. Rapport BRGM R 38523, 1995.

LAUGA R., *Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en Génie Civil et en forages profonds*. ISBN 2-907 843-13-3 Sesam Edition. 1990

LOUPOUKHINE M., VIGOUROUX P., *Memento technique des eaux minérales*. Rapport BRGM R 40145, 1998.

MABILLOT A., *Les forages d'eau – Guide pratique*. Tec et Doc – Lavoisier, 1995.

MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE, *Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau*. 2004

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES TRANSPORTS, *Marchés publics de travaux – Cahier des clauses techniques générales – Fascicule n°76 – Travaux de forage pour la recherche et l'exploitation d'eau potable*. Décret n°87-253 du 8 avril 1987

NGUYEN-THE D., *Etat et typologie des forages aux GTI en Lorraine*. Rapport BRGM/RP-58555-FR, 2010.

NORWEGIAN AGENCY FOR DEVELOPMENT COOPERATION, Standard descriptors for boreholes. Rapport. 2003

PLOTE H., *Sondage de reconnaissance hydrogéologique – Méthode du marteau fond-de-trou – Exécution et surveillance*. Manuels et Méthodes n°12. BRGM, 1986.

SILVESTRE J.P., *Développement du thermalisme sur le site de Plan de Phasy (05 Guillestre-Risoul) – Réalisation du forage de reconnaissance et d'exploitation F1 – Compte-rendu des travaux et études*. Rapport BRGM RR-37432-FR, 1993.

ROSCOE MOSS. Handbook of Ground Water Development. 512 pages ISBN: 978-0-471-85611-5. John Wiley Ed.; 1990

SOLAGES S., *Calcul des ouvrages de captage – choix et caractéristiques des colonnes de captage*. Rapport BRGM 79 SGN 727 HYD, 1979.

SOURISSEAU B, DAUM J.R., LONGIN G., Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement. Manuels et Méthodes n°31. BRGM, 1998.

SQUARCIONI P., Recaptage d'une ressource à plusieurs composantes : exemple de la source Geyser V à Montrond-les-Bains. Compte-rendu de la réunion technique de l'Association Française des Techniques Hydrothermales à Bagnoles-de-l'Orne, p17-21. 2015

VIGOUROUX P., GIRONDE C., *Projet PRESCRIRE – Préserver et protéger les ressources en eau souterraine – Le site de Montrond-les-Bains (42) – Rapport final*. Rapport BRGM RP-60748-FR. 2012.

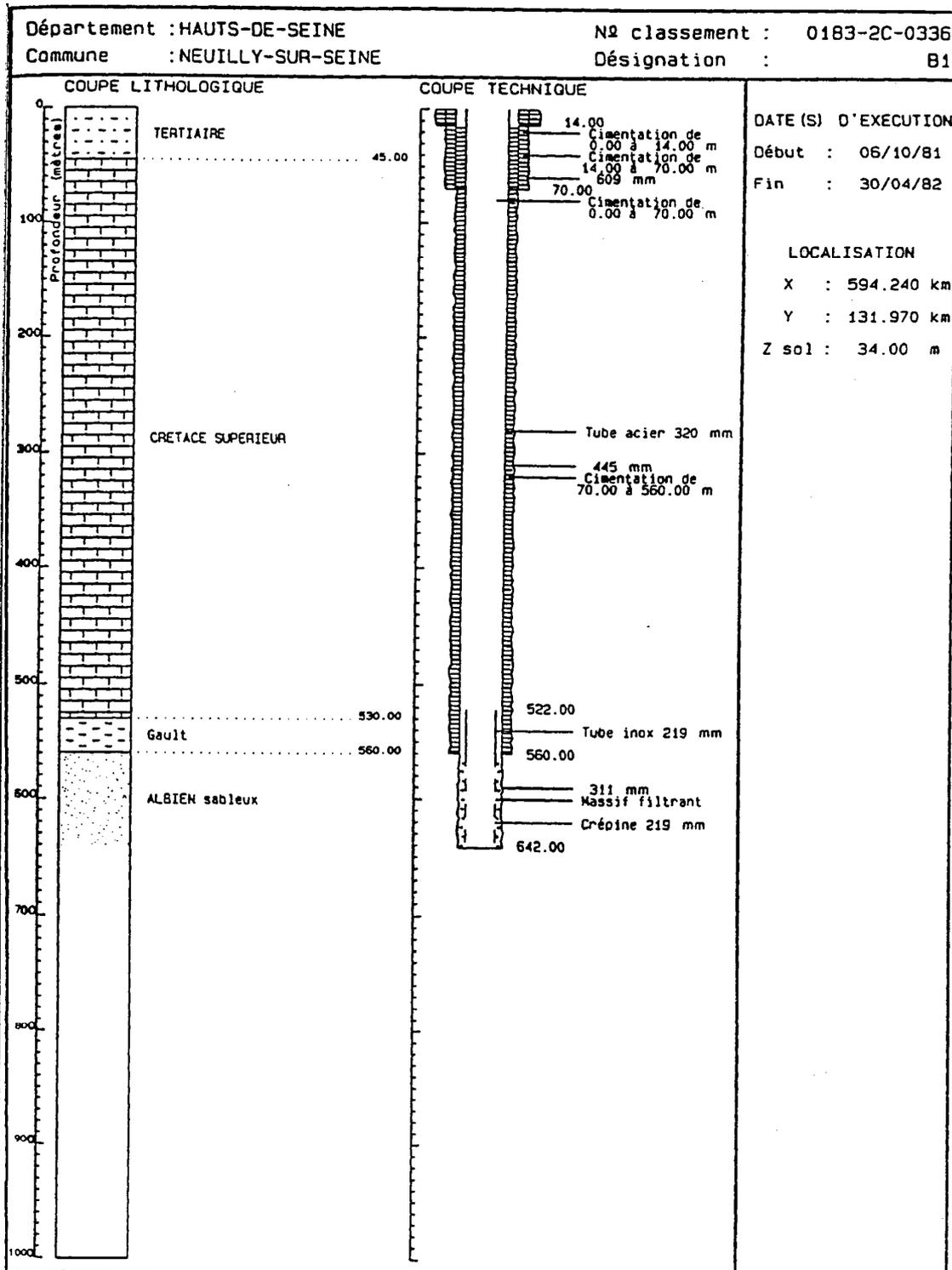
Actes du colloque "Le forage d'eau au XXIe siècle" – Association des Hydrogéologues du Service Public / Institut EGID – Bordeaux 3. Bordeaux, octobre 2008.

Annexe 3-A

Coupes techniques de forages hydrogéologiques existants en aquifères non consolidés (extraites de la banque du sous-sol)

Bassin Parisien

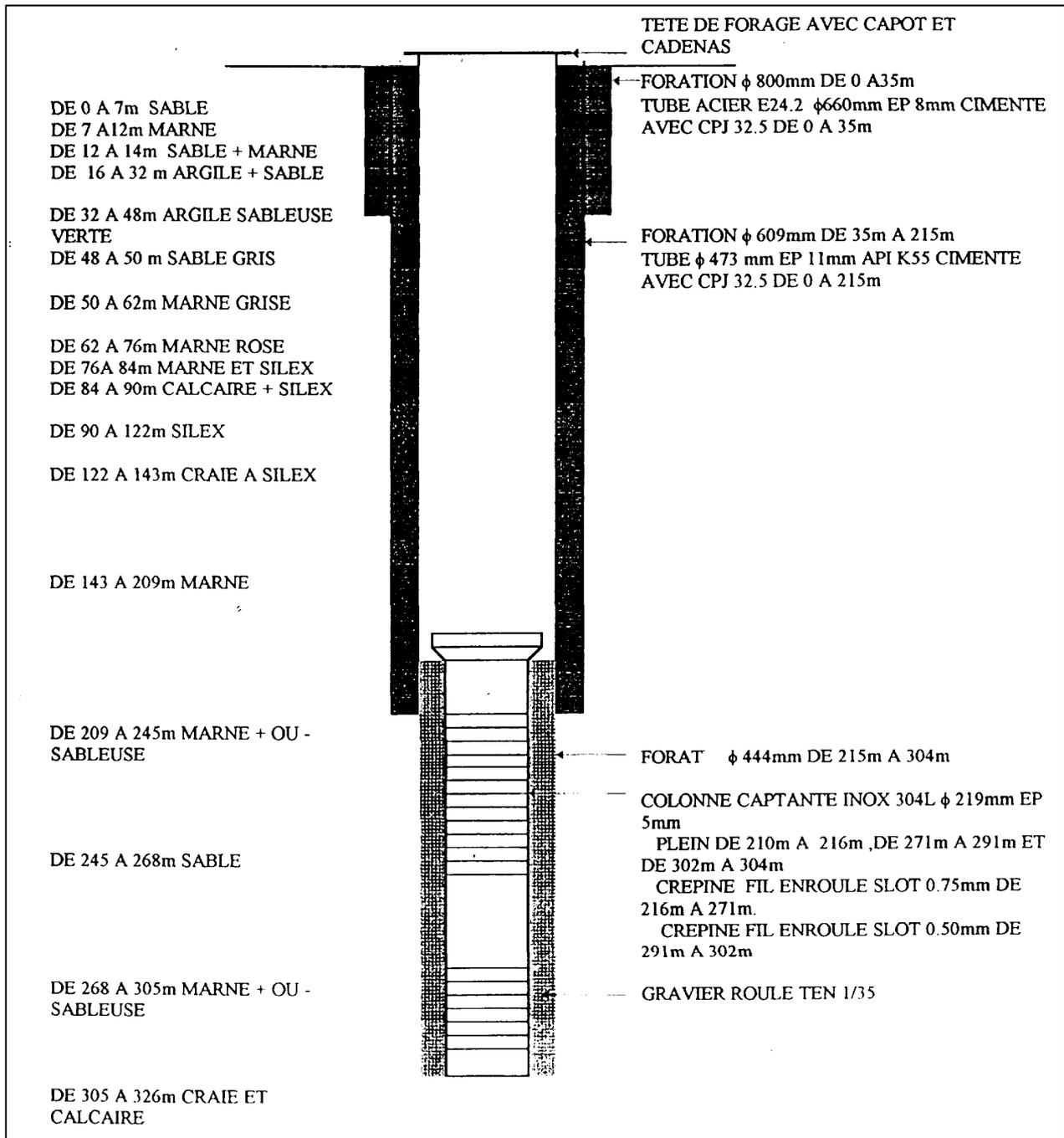
Forage B1 de Neuilly-sur-Seine (01832X0336/B1) – Albién – 1981/1982



(donnée BRGM)

Bassin Parisien

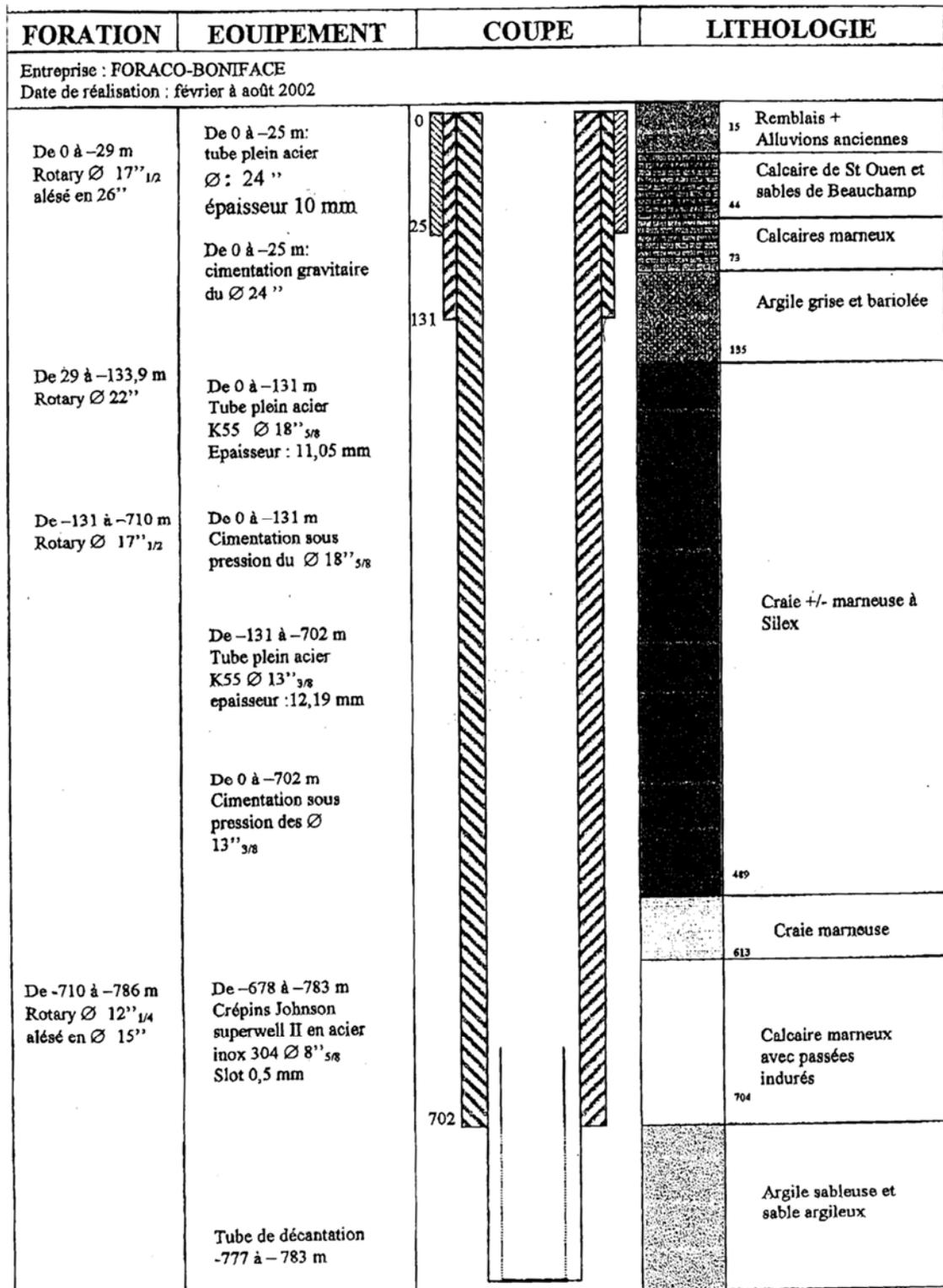
Forage d'exploitation de Souesmes (04621X0057/FAEP) – 2000



(document SADE)

Bassin Parisien

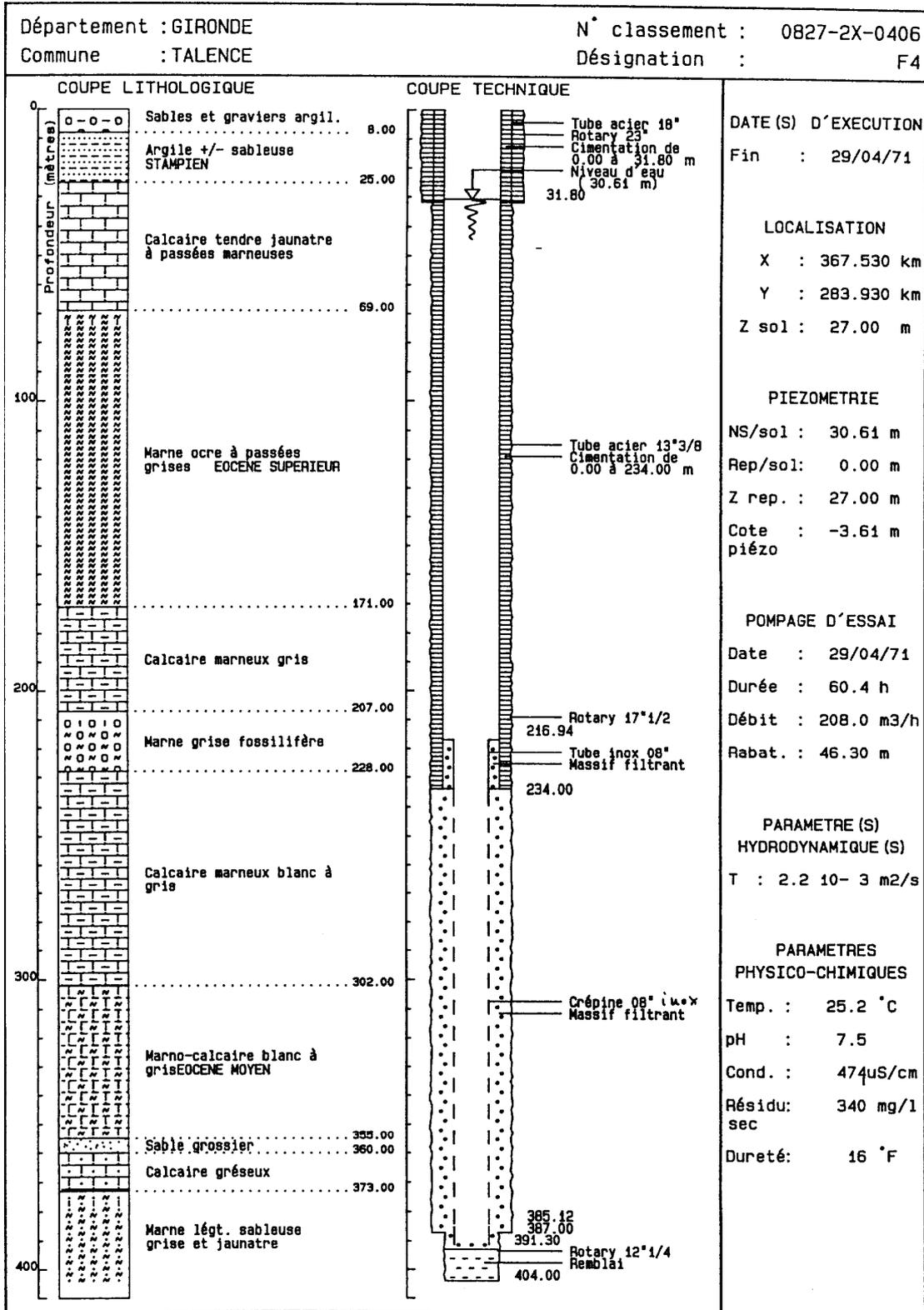
Forage F3bis de Villeneuve-la-Garenne (01832B0415/F3BIS) – Albiens – 2002



(document SAFEGE)

Bassin Aquitain

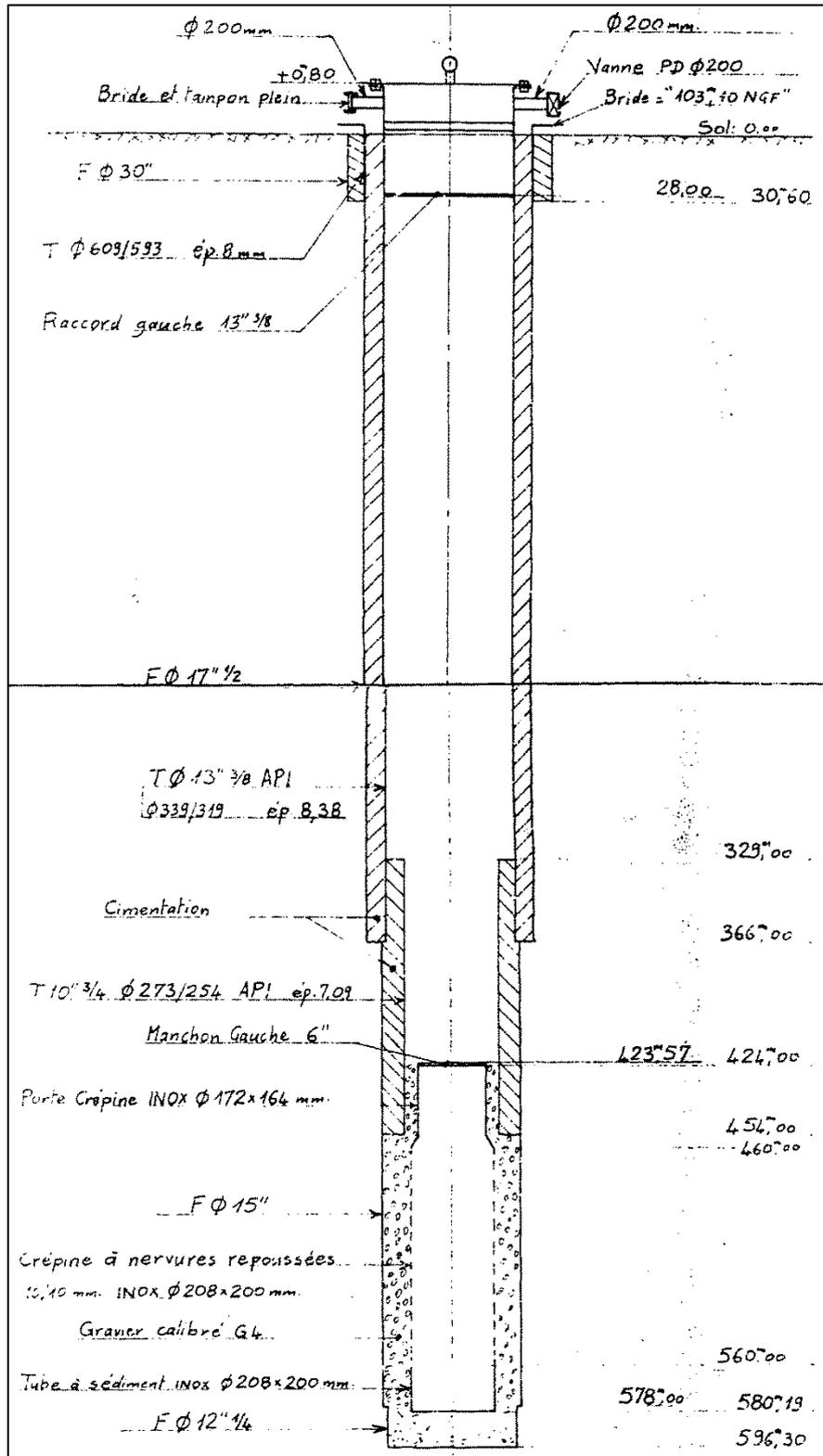
Forage de Talence (Lavardens – 08272X0406/F4) – Eocène –1971



(document BRGM)

Bassin Aquitain

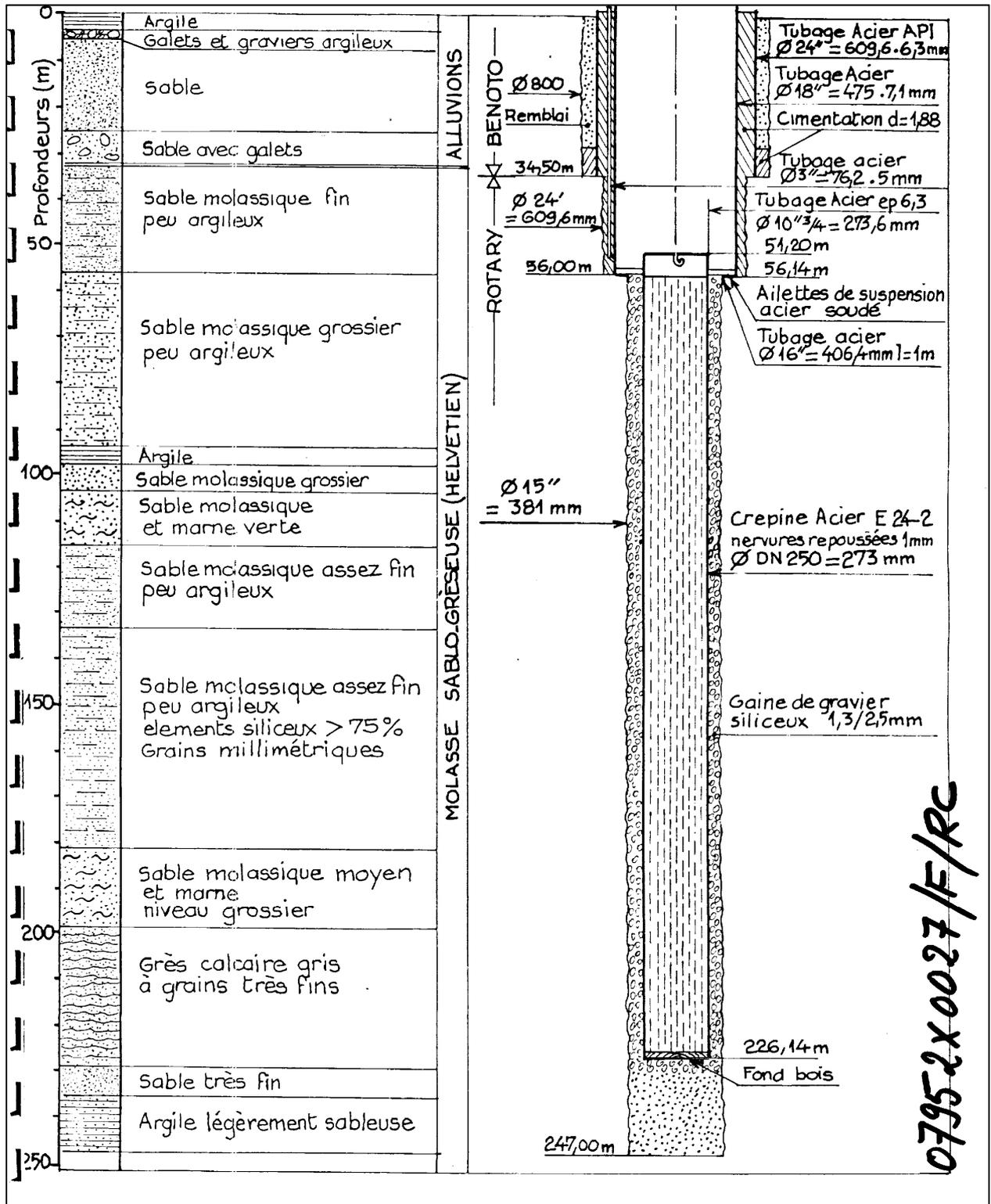
Forage de Barbotan-les-Thermes (Uby – 09268X0055/F) – sables infra-molassiques 1981



(document Intrafor-Cofor)

Molasse du Bas-Dauphiné

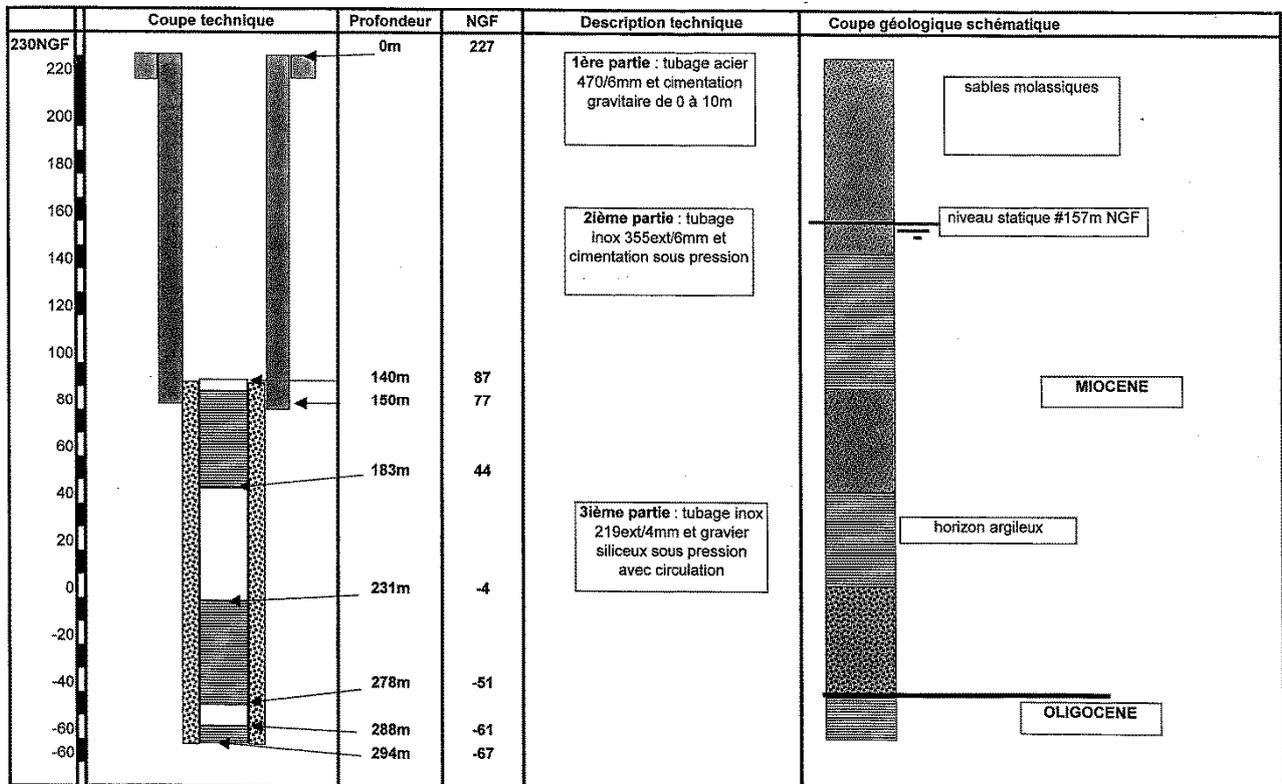
Forage de Châtillon-Saint-Jean (l'Aygala – 07952X0027/F) – 1996



(document SIE de l'Herbasse)

Molasse du Bas-Dauphiné

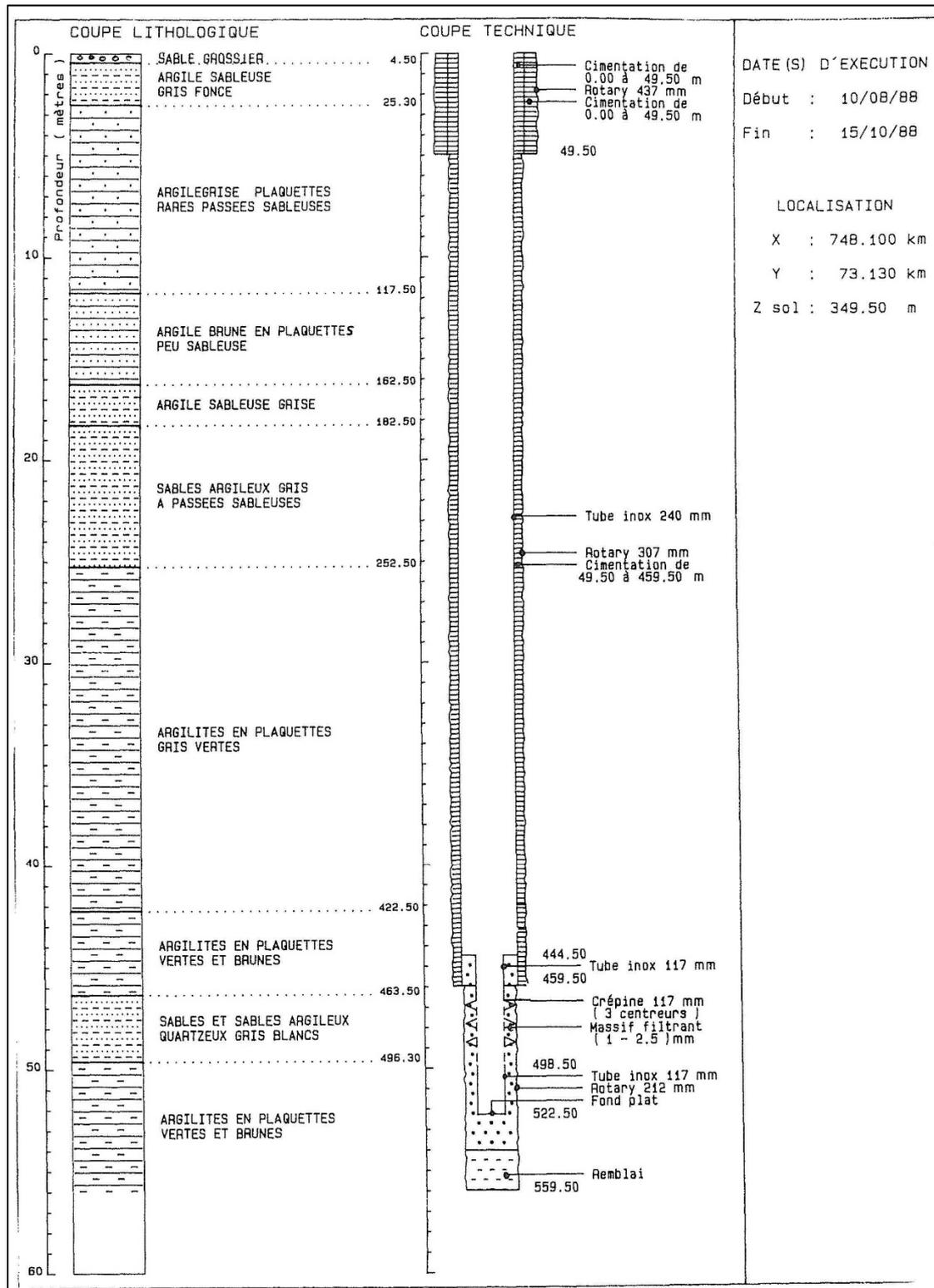
Forage de Montoison (08423X0073/F) – 2003



(document Idées Eaux)

Plaine du Forez

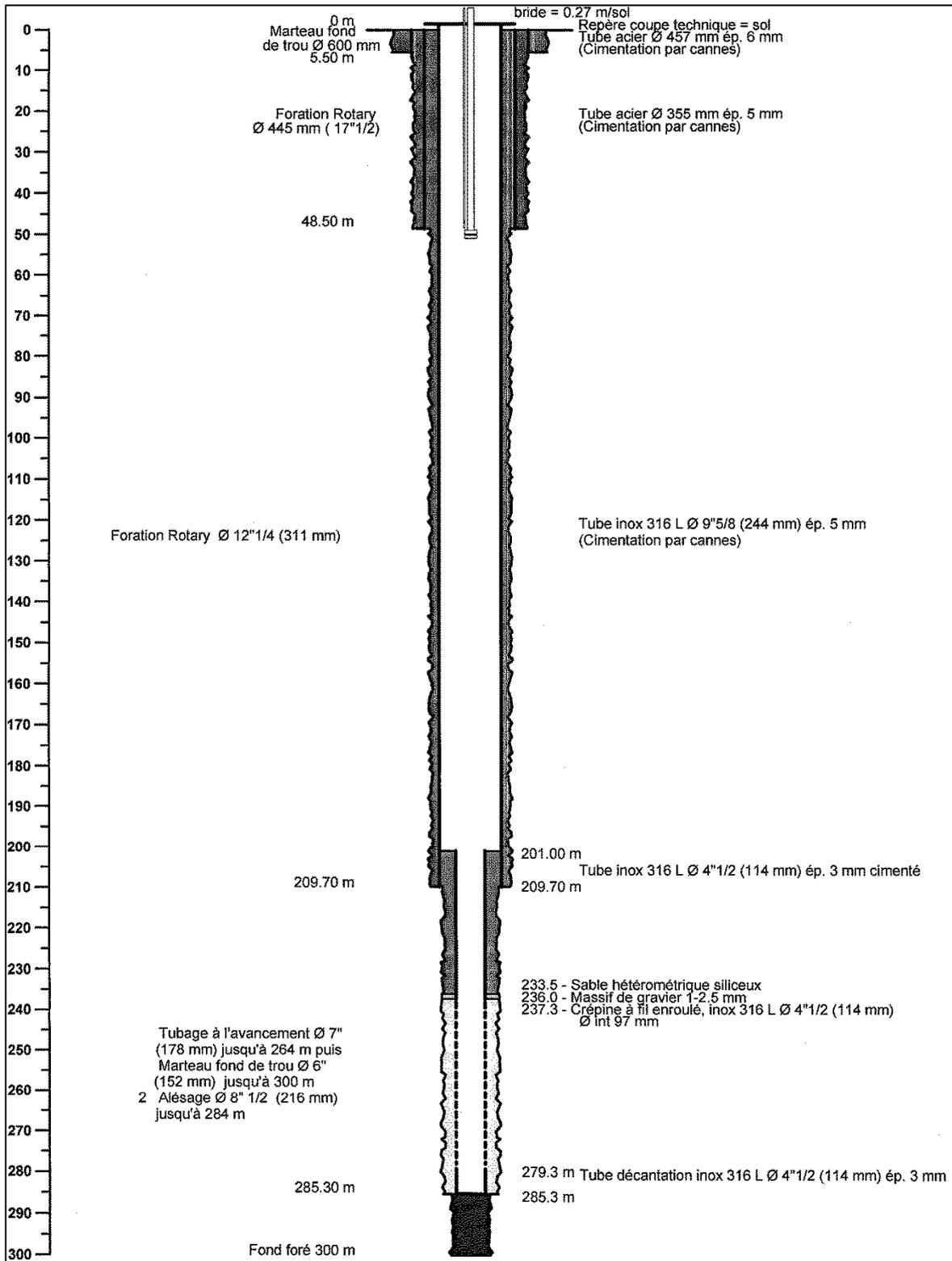
Forage de Montrond-les-Bains (Détente – 07204X0079) – 1988



(document BRGM)

Plaine du Forez

Forage de Montrond-les-Bains (MON3 – 07204X0085/MON3) - 2004



(document Hydro Invest)



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

Direction Régionale Nouvelle Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24 avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70